

50X1-HUM

Page Denied

Next 2 Page(s) In Document Denied

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Вып. XX

МЕТЕОРИТИКА

1961 год

А. А. ЯВНЕЛЬ

О ЗАВИСИМОСТИ СТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНЫХ МЕТЕОРИТОВ
ОТ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И УСЛОВИЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Для решения проблемы происхождения метеоритов большое значение имеет выяснение условий кристаллизации метеоритного вещества. Известный материал для характеристики этих условий может дать изучение структуры железных метеоритов, имеющей ряд особенностей. Одной из таких особенностей является наличие в наиболее распространенном типе железных метеоритов — октаэдриках видманштеттеновой структуры с различной шириной камаситовых балок. Последнее обстоятельство послужило основанием для условного разделения октаэдриков по этому признаку на различные структурные типы.

Давно уже было замечено, что существует известная связь между структурой железных метеоритов и содержанием в них никеля, а именно с увеличением никеля железные метеориты образуют ряд: гексаэдриты — октаэдриты (от весьма грубоструктурных до весьма тонкоструктурных) — атакситы, богатые никелем. Среднее содержание никеля в железных метеоритах различных структурных типов было дано Н. Н. Чирвинским [1], а затем Бадхью [2]. Перри [3] привел интервалы концентраций никеля в весьма грубоструктурных и грубоструктурных; среднеструктурных; тонкоструктурных и весьма тонкоструктурных октаэдриках.

Для объяснения этой общей связи может быть использована диаграмма состояния системы Fe — Ni. Согласно этой диаграмме, метеориты, содержащие до 6% никеля, должны быть однофазными, состоящими из камасита, что соответствует гексаэдритам. Метеориты с содержанием от 6 до 45% никеля должны состоять из двух фаз — камасита и тэнита. При этом уменьшение ширины балок камасита с возрастанием концентрации никеля Перри [3] объясняет понижением температуры превращения $\gamma \rightarrow \alpha$, что приводит к замедлению диффузии никеля. Эта же причина, т. е. понижение температуры превращения сплава с возрастанием содержания никеля, приводит к образованию мелкозернистой структуры в атакситах, богатых никелем. По мнению Юлига [4], понижение температуры перехода $\gamma \rightarrow \alpha$ усиливается высоким давлением в метеоритном родоначальном теле. Отсюда следует, что структура железных метеоритов зависит не только от условий кристаллизации сплава, но и от содержания в нем никеля, т. е. от химического состава сплава.

Правда, некоторые авторы связь структуры железных метеоритов с их химическим составом объясняют по-иному. Например, Хейде [5, стр. 108] представляет данные Бадхью как зависимость химического состава от структуры, а А. Н. Заварицкий [6, стр. 77] говорит о том, что химический состав и структура железных метеоритов определяются

его минеральным составом. Однако эти взгляды не согласуются с данными металловедения о фазовых превращениях в сплавах.

Таким образом, чтобы выяснить зависимость структуры железных метеоритов от условий кристаллизации (и перекристаллизации) сплава, прежде всего необходимо выделить из общей зависимости структуры от условий кристаллизации и химического состава. Очевидно, интересующая нас зависимость должна выявиться на фоне фактических данных о соотношении между структурой железных метеоритов и их составом.

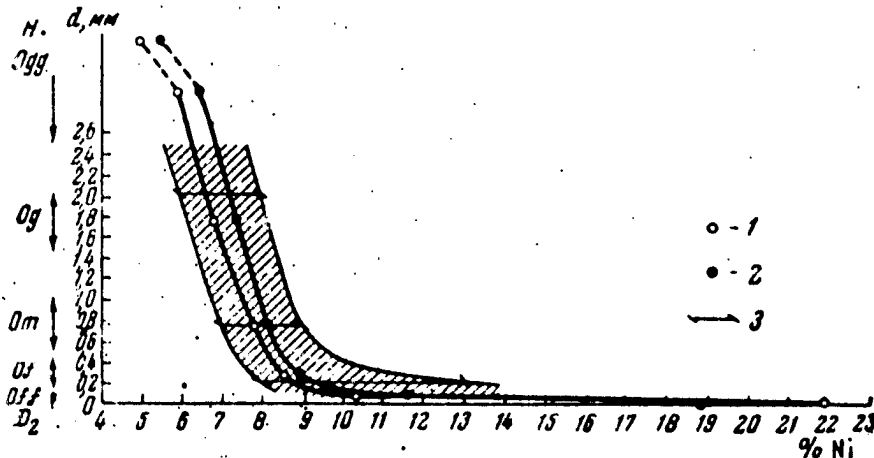


Рис. 1. Зависимость структуры железных метеоритов от содержания никеля
Данные: 1 — Чирвинского (1922); 2 — Бадхью (1946); 3 — Перри (1944)

Это соотношение было решено представить графически в координатах: ширина камаситовых балок — содержание никеля. На соответствующем графике (фиг. 1) нанесены упомянутые выше данные П. Н. Чирвинского, Бадхью и Перри о связи структуры с составом железных метеоритов. Ширина камаситовых балок для гексаэдритов здесь приведена вне масштаба, а для атакситов принята близкой к нулю.

Сравнение этих данных, полученных на различном статистическом материале, свидетельствует о том, что средние цифры находятся внутри интервала концентраций, указанного Перри, несмотря на их расхождение у П. Н. Чирвинского и Бадхью. Рассмотрение полученного графика наглядно показывает, что соотношение между структурой и содержанием никеля в железных метеоритах имеет вид широкой полосы. Это свидетельствует о наличии общей, но неоднозначной связи между рассматриваемыми величинами.

Важным моментом здесь является следующее обстоятельство. Если ранее обращалось внимание на различное содержание никеля в метеоритах какого-либо структурного типа, что, по-видимому, не имеет физического смысла, то вид графика наглядно свидетельствует о том, что у метеоритов с одинаковым содержанием никеля наблюдается различная структура. А это говорит уже о различии условий образования таких метеоритов и заставляет искать в них другие отличия, характеризующие эти условия. Кроме того, обращает на себя внимание довольно резкий перегиб полосы в области тонкоструктурных октаэдритов, причина которого также требовала выяснения.

Таким образом, изменение подхода к изучаемому явлению — рассмотрение структуры в качестве производной от химического состава, а не наоборот — дает направление для новых исследований этого вопроса.

Прежде всего было решено обратиться к таким данным о составе железных метеоритов, которые могли бы свидетельствовать о различных условиях образования последних. К ним, по-видимому, относятся обнаруженные Брауном и его сотрудниками [7], [8] четыре группы железных метеоритов, отличающиеся содержанием малых примесей галлия и германия. Хотя причина образования в железных метеоритах определенных уровней концентрации этих рассеянных элементов пока не ясна, но можно полагать, что метеориты разных Ga — Ge-групп находились в различных условиях в период формирования их вещества. Отсюда вытекало также предположение, что и кристаллизация метеоритов этих групп могла происходить в различных условиях.

В результате возникла мысль о том, что сложный вид зависимости структуры железных метеоритов от содержания никеля может в известной степени объясняться наличием различных групп железных метеоритов с разным характером такой зависимости. В этом случае можно ожидать, что показанная на графике (фиг. 1) широкая полоса в действительности состоит из нескольких ветвей, отвечающих различным Ga — Ge-группам.

Таким образом, задача сводится к поискам связи между структурой, количеством никеля и содержанием галлия и германия в железных метеоритах. Прямое сопоставление указанных величин производили Браун с сотрудниками [7], [8], но пришли к выводу, что между этими тремя характеристиками определенной связи нет. Отсутствие однозначной зависимости между структурой и содержанием никеля получилось и у нас, но это, конечно, не означает, что здесь не могут быть найдены определенные закономерности.

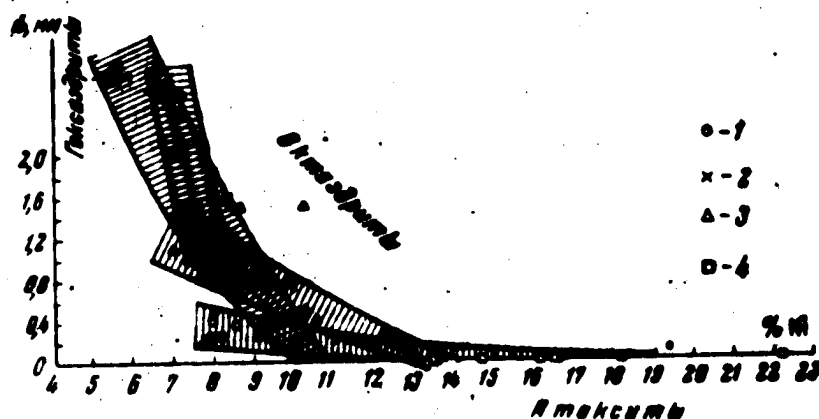
Для проверки высказанного выше предположения был построен график в тех же координатах, что и предыдущий, на котором нанесены данные о ширине камаситовых балок и содержании никеля в метеоритах различных Ga — Ge-групп по результатам работ Брауна и др. [7], [8]. Все точки на графике, отвечающие данным отдельных метеоритов, легли в определенные участки. Имеющийся выпад для метеорита Providence скорее всего объясняется неточностью анализа этого метеорита. Для него было принято содержание никеля, равное 10,30%, по данным Янга [9]. Однако содержание кобальта — 0,30%, найденное при этом анализе, оказалось значительно ниже более позднего определения — 0,50% [8], что, по-видимому, указывает на обогащение анализируемой пробы [9] тантитом, содержащим намного меньше кобальта, чем камасит. Отсюда можно полагать, что указанная концентрация никеля по этой причине является завышенной, так как тантит по сравнению с камаситом содержит существенно больше никеля.

Полученный график, представленный на фиг. 2, подтвердил предположение о возможном разделении полосы на отдельные ветви. Как видно, зависимость ширины камаситовых балок железных метеоритов от содержания никеля представляет собой четыре полосы, соответствующие четырем Ga — Ge-группам, имеющие различный наклон и пересекающиеся друг с другом. В сумме эти четыре полосы дают картину, наблюдающуюся на фиг. 2.

Полученные результаты дают возможность в известной мере разобратся в сложном характере зависимости структуры от состава. Так, например, различный наклон этих ветвей объясняет перегиб полосы на фиг. 1. Наиболее важно здесь, по-видимому, то обстоятельство, что наклон полос изменяется закономерно. С переходом от I Ga — Ge-группы к IV группе наклон по отношению к оси концентраций никеля последовательно уменьшается. Это означает, что железные метеориты, содержащие максимальные количества галлия и германия, показывают также

гораздо более отчетливую зависимость ширины камаситовых балок от содержания никеля, чем зависимость у метеоритов с минимальным содержанием этих элементов.

Такое резкое различие вряд ли можно объяснить влиянием мельчайших примесей галлия и германия на скорость роста кристаллов α -фазы, хотя примеры воздействия малых добавок отдельных элементов на структуру сплавов известны. В данном случае такому предположению противоречит пересечение различных ветвей между собой, что означало бы



Фиг. 2. Зависимость структуры железных метеоритов различных Ga-Ge-групп от содержания никеля

	Группа	Ga. 10^{-4} %	Ge. 10^{-4} %
1	I	80—100	300—420
2	II	40—65	120—220
3	III	8—24	15—80
4	IV	1—8	< 1—1

противоположный характер влияния галлия и германия на ширину камаситовых балок при небольшом различии в содержании никеля в сплаве. Например, в сплаве с 8% Ni повышение содержания Ga и Ge увеличивает ширину балок α -фазы, а в сплаве с 10% Ni подобное же повышение концентрации этих элементов уменьшает указанную ширину.

По-видимому, различная зависимость структуры от содержания Ni в метеоритах разных Ga — Ge-групп свидетельствует о неодинаковых условиях кристаллизации метеоритного железа этих групп. Поэтому различие в содержании галлия и германия, очевидно, возникшее раньше, не является причиной разных условий образования структуры метеоритного вещества. Как образование Ga — Ge-групп метеоритов, так и различные условия их кристаллизации, по-видимому, являются следствием общей причины, ввиду чего содержание галлия и германия в железных метеоритах может быть лишь признаком условий образования их структуры.

Рассмотрение графика позволяет произвести некоторый анализ зависимости структуры железных метеоритов от содержания никеля и условий ее образования.

Как видно, каждая полоса имеет наклон в сторону больших концентраций никеля, что, как указывалось выше, обусловлено зависимостью температуры начала превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ от содержания никеля. Таким образом, общий характер наклона полос в конечном счете, по-видимому, определяется химическим составом вещества железных метеоритов. Различия в наклоне полос, соответствующие метеоритам разных Ga — Ge-групп, возможно, являются следствием разных скоростей охлаждения сплава, давления и других факторов. В итоге мы обнаруживаем влияние некоторых условий кристаллизации на общую зависимость структур от состава метеоритного вещества. Наконец, неоднозначная зависимость структуры от состава, которая проявляется в различной структуре метеоритов, принадлежащих к одной и той же Ga — Ge-группе и имеющей одинаковое содержание никеля, может, кроме приведенных выше факторов, объясняться также фиксацией структуры сплава при его реаком охлаждении с различных температур. В итоге этого рассмотрения удается в определенной мере разделить влияние химического состава и условий кристаллизации на структуру железных метеоритов.

Очевидно, что различные условия образования структуры можно выделить, если рассмотреть железные метеориты, принадлежащие к различным Ga — Ge-группам и отличающиеся по структуре, но содержащие одинаковое количество никеля. Для этой цели в качестве одного из методов исследования можно применить изучение состава фаз метеоритного железа путем локального рентгеноспектрального анализа.

Как показали наши исследования [10], при этом можно определить концентрацию никеля на границе фаз, а также внутри γ -фазы (тэнита). По-видимому, чем выше скорость охлаждения сплава, тем больше должна быть степень его неравновесности, т. е. меньше содержание никеля внутри тэнитовых полос. С другой стороны, с понижением температуры, при которой происходит фиксация структуры метеорита, должно возрастать содержание никеля на границе фаз. Отсюда можно ожидать, что более грубоструктурные октаэдриты (с одинаковым содержанием никеля), которые могли охлаждаться более медленно и до более низких температур, должны иметь более высокое содержание никеля как внутри тэнитовых полос, так и на границах фаз.

Для выяснений указанных различий было произведено сравнительное исследование трех железных метеоритов, данные о химическом составе и структуре которых приведены в таблице.

Метеорит	Ni, %	Co, %	Ga, 10 ⁻⁴ %	Ge, 10 ⁻⁴ %	Ga—Ge-группа	d, мм	Тип
Henbury	7,94	0,49	60	209	II	0,90	Om
Boxhole	7,72	0,50	13	31	III	0,80	Om
Bethany	7,06	0,39	2	1	IV	0,40	Of

Как видно из таблицы, исследованные метеориты имеют приблизительно одинаковое содержание никеля, но принадлежат к разным Ga — Ge-группам и имеют различную структуру (ширину камаситовых балок—d). Внутри тэнитовых полос в них наблюдалась тонкодисперсная смесь $\alpha + \gamma$ -фаз — плотный плессит. Можно полагать, что приведенные выше рассуждения о содержании никеля внутри тэнитовых полос относятся и к плесситу, который является результатом распада тэнита.

Содержание никеля в плессите удалось измерить в двух метеоритах — Henbury и Bethany. В результате многократных измерений оказалось, что концентрация никеля в плессите метеорита Henbury на несколько

процентов выше, чем в метеорите Bethany. Количество никеля в камасите увеличивается на границе этих фаз, определенное более точно в камасите, также было максимальным в метеорите Henbury, меньше в метеорите Bixby и еще меньше в метеорите Bethany. При этом разница концентраций здесь больше, чем внутри танитовой фазы — в плессите.

Таким образом, первые измерения состава фаз метеоритов различными группами показывают достаточную чувствительность примененного метода и, очевидно, подтверждают предположения о различии условий кристаллизации, высказанные выше. Конечно для надежных выводов в этом вопросе необходимы дальнейшие исследования. Возможно, что при этом будут замечены определенные отклонения от найденных закономерностей, которые приведут к выяснению влияния других факторов на структуру железных метеоритов, в частности давления. Можно полагать также, что результаты таких исследований дадут возможность подойти и к выяснению более ранней истории железных метеоритов, в частности найти причину образования в них определенных уровней галлия и германия.

Полученные данные позволяют в настоящее время прийти к выводу, что на зависимость структуры железных метеоритов от содержания никеля влияет ряд факторов. Высокое давление может быть одним из таких факторов, однако объяснять всю сложную картину влиянием одного давления, как это сделал Юлиг [4], очевидно, нельзя. Недостатки схемы образования структуры железных метеоритов, предложенной Юлигом, видны хотя бы из того, что он исходил из предположения о твердой границе между октаэдритовой и атакситовой структурами при 13% никеля. Откуда им была получена величина давления в недрах родоначального тела порядка 10^5 атм. Однако, как видно из графика на фиг. 2, октаэдритовая структура встречается и при более высоких концентрациях никеля, например в IV Ga — Ge-группе — около 17% Ni, а, с другой стороны, в остальных Ga — Ge-группах атакситовая структура может встречаться при содержании никеля значительно меньшем, чем 13%. Последнее обстоятельство заставило бы предположить при образовании железных метеоритов наличие давлений, много больших, чем 10^5 атм, что весьма сомнительно.

Таким образом, при рассмотрении образования структуры железных метеоритов, по-видимому, необходимо иметь в виду более сложные условия, чем это предполагалось ранее.

Среди других выводов данной работы можно указать на следующие. Если спроектировать график фиг. 2 на ось концентраций, то мы получим кривую распределения железных метеоритов по содержанию никеля, имеющую максимумы, аналогичные найденным нами ранее [11]. Рассмотрение этого вопроса показывает, что первая Ni-группа железных метеоритов (с резким максимумом при 5,6% Ni) отвечает максимуму II Ga — Ge-группы, точнее, части этой группы с более низким содержанием данных элементов — $40-60 \cdot 10^{-4}\%$ Ga и $130-165 \cdot 10^{-4}\%$ Ge. Вторая Ni-группа (с максимумом 8% Ni) представляет собой наложение друг на друга максимумов III, IV и частично I Ga — Ge-групп. Таким образом выявляется более сложный характер этого распределения.

Если же спроектировать этот график на ось структур, то в местах наложения смежных Ga — Ge-групп также образуются максимумы. В результате этого обнаруживается сходство с данными Брауна и др. [8] о наличии трех максимумов в распределении железных метеоритов по пирири камаситовых балок. При этом грубоструктурные октаэдриты (по классификации, предложенной этими авторами) отвечают наложению вышней I и II Ga — Ge-групп, среднеструктурные — II и III, а тонкоструктурные — III и IV. Поэтому хотя это новое разделение железных метеоритов по структуре не является таким условным, как раньше, но оно

лишь в какой-то мере отражает сложные закономерности, имеющиеся в их составе. Для характеристики генетических особенностей железных метеоритов первым признаком их классификации очевидно должен быть химический состав — принадлежность к никелевым и галлий-германиевым группам.

В заключение автор выражает благодарность И. Б. Боровскому и И. Д. Марчуковой (Институт металлургии АН СССР) за проведение рентгеноспектрального анализа фаз образцов железных метеоритов.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Н. Чирвинский. Метеоритика, вып. 5, 39, 1949; H. Michel. Fortschr. Mineral., Kristallogr. u. Petrogr., 7, 294, 1922.
2. J. D. Buddhue. Popul. Astron., 54, № 3, 149, 1946.
3. S. H. Perry. The metallography of meteoric iron. Washington, 1944.
4. S. H. Uhlig. Geochim. et cosmochim. acta, 6, No 5/6, 282, 1954.
5. F. Heide. Kleine Meteoritenkunde. Berlin—Göttingen—Heidelberg, 1957.
6. А. Н. Заварницкий. Работы по метеоритике Изд-во АН СССР, 1956.
7. E. Goldberg, A. Uchijama, H. Brown. Geochim. et cosmochim. acta, 2, No 1, 1, 1951.
8. J. F. Lovering, W. Nichiporuk, A. Chodos, H. Brown. Geochim. et cosmochim. acta, 11, No 4, 263, 1957.
9. D. M. Young. Popul. Astron., 47, No 7, 382, 1939.
10. А. А. Явнель, И. Б. Боровский и др. Докл. АН СССР, 123, № 2, 256, 1958.
11. А. А. Явнель. Докл. АН СССР, 102, № 3, 477, 1955.

Академия наук СССР

Геохимия

№ 2, 1956

А. А. Явнель

ЗАКОНОМЕРНОСТИ В СОСТАВЕ МЕТЕОРИТНОГО ВЕЩЕСТВА
И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТЕОРИТОВ

ЗАКОНОМЕРНОСТИ В СОСТАВЕ МЕТЕОРИТНОГО ВЕЩЕСТВА И КЛАССИФИКАЦИИ МЕТЕОРИТОВ

А. А. ЯВНЕЛЬ

Комитет по метеоритам Академии наук СССР, Москва

Изучение метеоритного вещества, а именно его химического и минерального состава и структуры, которое проводится в течение десятков лет, уже дало богатый материал для суждения о природе метеоритов. Дальнейшее углубление наших знаний в этой области, которые в сочетании с космогоническими данными должны служить основной цели — выяснению условий образования метеоритов — требует прежде всего обобщения имеющегося материала.

Большую роль в этом вопросе должна сыграть наиболее обоснованная и строго последовательная классификация метеоритов по их вещественному составу, т. е. по химико-минеральному составу и структуре. В настоящее время нет общепринятой классификации метеоритов. Ряд исследователей пользуется классификацией Розе — Чермака — Бржезинны [1]; во многих каталогах и статьях применяется более поздняя классификация Прайора [2], наконец, авторы некоторых советских работ дают характеристику метеоритов СССР по классификации Заварицкого [3]. Вместе с тем в этих классификациях не всегда отражены основные особенности метеоритов, важные в генетическом отношении. Все это заставляет поднять вопрос о критическом рассмотрении существующих классификаций метеоритов с целью их дальнейшего совершенствования и унификации. Прежде чем перейти к этому разбору, следует сделать несколько общих замечаний по поводу основных принципов классификации метеоритов. Разработку такой классификации можно разделить на два этапа: 1) выбор признаков, по которым производится разделение всех метеоритов на определенные группы; 2) систематизация этих групп. К числу таких признаков, которые применяются в различных классификациях метеоритов, относятся химический и минеральный составы, вид структуры, а иногда и отдельные ее детали, проявления метаморфизма, цвет метеоритов и др. Что касается систематизации групп, то в отдельных классификациях имеется разное число ступеней подразделения: классов, подклассов, типов и т. д., расположенных в известной последовательности и сочетании.

Весьма важным моментом в этом вопросе является правильный выбор признаков, определяющий основной принцип построения классификации. При этом последовательность классификации по различным признакам должна, как нам кажется, соответствовать ходу процесса образования вещества метеоритов.

Основные этапы этого процесса схематически можно представить в виде объединения отдельных химических элементов и соединений, за которым следует образование минеральных агрегатов, а затем сочетание различных минералов в форме тех или иных структур. Естественно, что на протяжении всего процесса эволюции метеоритного вещества могло происходить дальнейшее изменение как его химического, так и минерального состава, наряду с изменением структуры. Но эти явления носят вторичный характер и не нарушают общей последовательности основного

процесса. Исходя из этого, первоначальным признаком классификации метеоритов должен являться их химический состав, затем минеральный состав, структура и далее — остальные признаки. При этом нужно отметить, что химический признак всегда играл определенную роль в каждой классификации, начиная с начала XIX в., когда было произведено разделение метеоритов на каменные и железные. С тех пор классификация метеоритов по химическому составу претерпела большие изменения. По имеющимся в настоящее время данным все метеориты по возрастанию среднего содержания Fe, которое характеризуется количеством никелистого железа, можно разделить на 3 класса: каменные, железо-каменные и железные. Эти классы, в свою очередь, делятся на 6 видов, значение которых будет показано далее, а именно: 1) ахондриты, богатые кальцием; 2) ахондриты, бедные кальцием; 3) хондриты; 4) железо-каменные (сидеролиты); 5) каменно-железные (литосидериты); 6) железные (сидериты).

Следующим моментом является систематизация материала в классификации. В этой части классификация метеоритов, в целях стройности, должна, по нашему мнению, отвечать следующим требованиям: 1) она должна быть построена по одной системе, общей для всех видов метеоритов; 2) в ней на соответствующих стадиях должен соблюдаться принцип разделения метеоритов по одинаковым признакам.

Следует указать, что между существующими классификациями метеоритов имеются принципиальные различия в выборе признаков классификации. В этом отношении наиболее правильной, с нашей точки зрения, является лишь классификация Прайора [2], основанная на разделении метеоритов по химическому составу. К тому же, строго придерживаясь одного этого принципа, Прайор смог привести собранный материал в довольно стройную систему, что также выгодно отличает эту классификацию от остальных. В дальнейшем мы еще вернемся к классификации Прайора, а сейчас отметим, что выбор химического состава метеоритов в качестве основы их систематики заставляет обратить особое внимание на обобщение результатов анализов метеоритов различных типов. Поэтому в настоящее время, после того как автором [4] обнаружены известные закономерности в химическом составе метеоритов, появилась возможность строгого обоснования и дальнейшего совершенствования классификации метеоритов.

Как известно, многие метеориты, даже одного вида, имеют различия в содержании основных составляющих. Например, концентрация никеля в железных метеоритах находится в интервале от 4 до 60%, большие колебания наблюдаются также в количестве FeO и никелистого железа в хондритах и т. д.

До последнего времени считалось, что так как изменение состава в этих метеоритах происходит непрерывно, разделение их на группы может носить лишь условный характер. В действительности же дело происходит несколько иначе.

Хотя из числа метеоритов одного вида и можно найти такие, которые составляют ряд с постепенным изменением состава, но распределение метеоритов этого вида по содержанию некоторых составляющих показывает наличие среди них отдельных групп различного химического состава. Это наглядно видно на гистограммах состава метеоритов, т. е. графиках, где по оси абсцисс отложены концентрации характерных составляющих, а по оси ординат — число метеоритов данного состава (в определенном интервале концентраций). С этой целью рассмотрим приведенные ранее шесть видов метеоритов, но для удобства в обратном порядке. Начнем с железных метеоритов, которые, как указывалось выше, имеют большое различие в составе по содержанию никеля. Сводка имеющихся в литературе результатов определения концентрации никеля содержится в каталоге Прайора и Хей [5]. После дополнения ее данными некото-

80

А. А. ЯВНЕЛЬ

других работ, вышедших, в основном, за последнее время, нам удалось собрать результаты 478 анализов 377 железных метеоритов. Не делая из этого числа специального отбора, мы лишь отдали предпочтение более поздним данным для тех метеоритов, которые имеют несколько результатов анализа.

Весь интервал концентраций никеля был разделен на отрезки величиной в 0,2%, и на график наносились числа метеоритов, содержащих никель в этих пределах. Указанный график приведен на рис. 1, из которого видно, что распределение железных метеоритов по содержанию никеля имеет сложный вид. Прежде всего на графике можно отметить наличие двух максимумов — весьма резкого при 5,6% Ni и раздвоенного максимума — 8% Ni, которые указывают на наличие двух групп метеоритов соответствующего состава. Метеориты, входящие в эти две группы, составляют свыше 80% от всего числа рассмотренных железных метеоритов. Далее выделяется третья, менее многочисленная, группа метеоритов (приблизительно

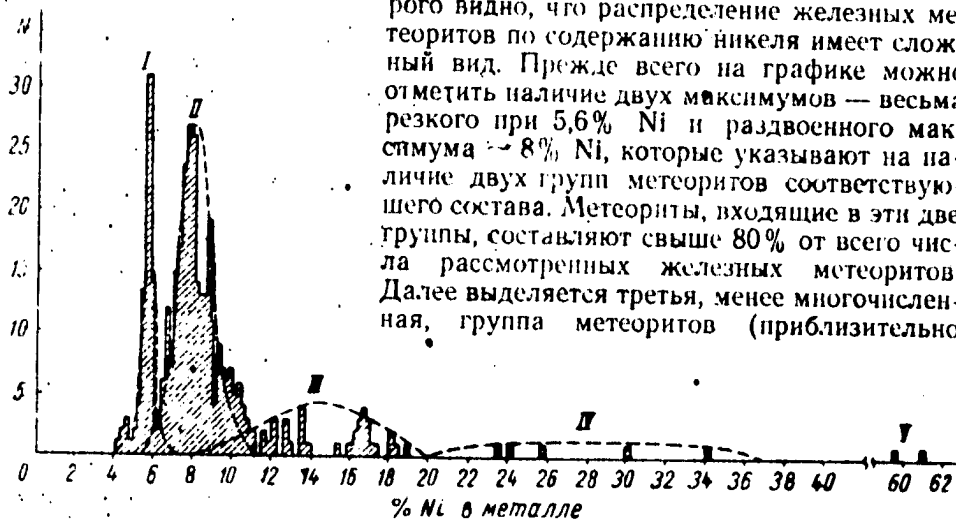


Рис. 1. Распределение железных метеоритов по содержанию Ni

15% от общего числа) со средним содержанием никеля — 14%. Кроме того, имеется 7 метеоритов (~ 5% от всего числа), которые содержат свыше 20% Ni. Из них пять метеоритов — Freda, Wedderburn, San Cristobal, Lime Creek и Santa Catharina — содержат никеля до 35%, остальные два метеорита — Lafayette и Oktibbeha County с содержанием ~ 60% Ni отстоят значительно дальше от них.

Таким образом, железные метеориты по содержанию Ni в первом приближении можно разделить на пять групп. Исходя из форм кривых, огибающих графики, можно оценить интервалы концентрации никеля в каждой группе*.

Первая группа метеоритов содержит никель в интервале от 4 до 7%, вторая — от 5,5 до 11%, третья — от 8 до 20%, четвертая — приблизительно от 20 до 40% и пятая — свыше 40%. Как видно, эти группы имеют различную ширину, увеличивающуюся с повышением содержания никеля; некоторые из них частично перекрывают друг друга.

Необходимо иметь в виду, что положение максимумов на кривой распределения метеоритов, отвечающее известным содержаниям никеля, не связано с диаграммой состояния системы Fe — Ni, которая определяет фазовый (минеральный) состав и структуру железных метеоритов, поэтому естественно трудно ожидать совпадения между найденными группами и отдельными структурными типами этих метеоритов.

Построив аналогичные гистограммы для отдельных структурных типов, мы определили границы концентраций никеля для каждого из них (гексаэдритов, октаэдритов и т. д.), откуда можно было выделить типы

* Здесь, как и в дальнейшем, мы не стремились к тому, чтобы площади, ограниченные кривыми, всегда соответствовали числу метеоритов в группе.

структур, имеющиеся в каждой группе. При этом оказалось, что первая группа в основном состоит из гексаэдритов и бедных никелем атакситов; кроме того, в нее входит большинство весьма грубоструктурных и часть тонкоструктурных октаэдритов. Во вторую группу входят главным образом среднеструктурные, а также большинство грубоструктурных и тонкоструктурных октаэдритов. Третья группа состоит из весьма тонкоструктурных октаэдритов и богатых никелем атакситов, а четвертая и пятая группы — только из богатых никелем атакситов.

Следует заметить, что в 1947 г. Брауном и Паттерсоном [6] приведены гистограммы состава железных метеоритов; на их графике, построенном на основании результатов анализа 215 железных метеоритов с содержанием никеля до 17%, также видны два максимума, соответствующие первым двум группам, указанным выше.

Переходя к метеоритам других видов, которые состоят в основном из двух фаз — железной и силикатной, необходимо иметь в виду, что их химический состав в целом определяется составом и соотношением этих фаз. Поэтому для характеристики указанных метеоритов требуются, по крайней мере, три величины — две, характеризующие состав каждой фазы, и третья, указывающая содержание одной из фаз в метеорите.

В качестве таких характерных показателей были выбраны: 1) содержание FeO в силикате; 2) содержание Ni в никелистом железе; 3) количество железной фазы в метеорите*.

После этого рассмотрим следующий за железными метеоритами вид — каменно-железные, которые почти целиком состоят из палласитов. Ограниченное число палласитов, часть которых к тому же не проанализирована, не дает возможности произвести четкую статистическую обработку данных об их составе. Однако некоторые предварительные выводы можно сделать и из имеющегося материала. Всего были использованы данные анализов 23 палласитов, имеющиеся в литературе.

Распределение палласитов по содержанию FeO в оливине (в интервалах 1%) показано на графике (рис. 2); из него видно, что оливин большей части палласитов содержит FeO в количестве от 10 до 15%, а меньшей их части — в пределах от 16 до 21%. Если произвести разделение палласитов по этому признаку на две группы, то оказывается, что никелистое железо палласитов, имеющих меньшее количество FeO, содержит никеля от 5,5 до 12%, что соответствует II группе железных метеоритов (рис. 1). Другая группа палласитов (с большим содержанием FeO) по составу никелистого железа 13—17% Ni близка к III группе железных метеоритов.

Кроме того, палласиты II группы содержат от 40 до 75% никелистого железа (в среднем ~ 57%), т. е. больше, чем палласиты III группы — типа Itzawis, содержащие его от 25 до 45% (в среднем ~ 35%), что видно из рис. 2, в. Содержание никелистого железа на этом графике отложено в убывающем порядке через каждые 5%. Отсюда видно, что в палласитах также намечается закономерная связь между количеством

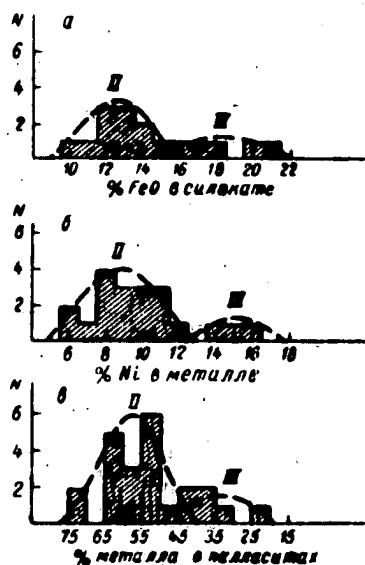


Рис. 2. Распределение палласитов по содержанию FeO, Ni и металла

* В дальнейшем ради сокращения мы называем силикатную фазу (часть) метеоритов «силикатом», а металлическую — «металлом».

и составом никелистого железа и содержанием FeO в силикатной части, ранее обнаруженная Прайором [7] в хондритах.

Таким образом, палласиты обеих групп отличаются как по составу входящих в них фаз — оливина и никелистого железа, так и по их относительному количеству. Попутно укажем, что если посмотреть на график (рис. 2, в), то можно заметить, что палласиты II группы, в свою очередь, подразделяются по количеству в них никелистого железа на две подгруппы с максимумами $\sim 52\%$ и $\sim 62\%$. В первую подгруппу входит в числе других метеоритов Палласово Железо, а во вторую — Брагин. Эти палласиты, как известно, отличаются друг от друга также и формой

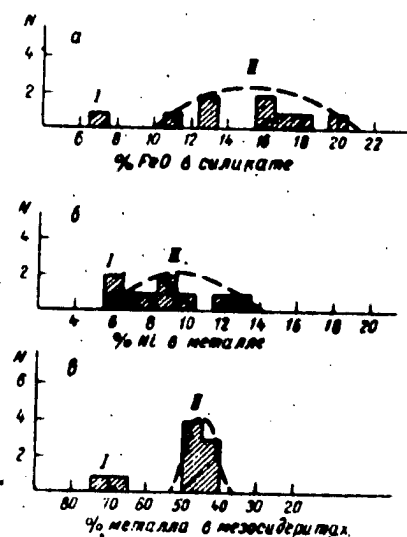


Рис. 3. Распределение мезосидеритов по содержанию FeO , Ni и металла

зерен оливина, что указывает на различие в условиях их образования. Однако подобное разделение, произведенное в пределах одной группы, имеющей сравнительно однородный состав фаз, аналогично разграничению какой-либо группы железных метеоритов по структурным признакам и является уже подразделением следующего порядка по сравнению с приведенным ранее.

За палласитами следуют железно-каменные метеориты, к которым прежде всего относится немногочисленная группа мезосидеритов. На графики (рис. 3) нанесены результаты анализов 9 мезосидеритов, собранные по литературным данным.

Содержание FeO , Ni и никелистого железа отмечалось здесь через каждый процент. Однако малая статистика и неоднородный состав силикатной части мезосидеритов по содержанию всех основных компонентов: SiO_2 , MgO , FeO ,

Al_2O_3 и CaO , не дают возможности сделать определенные выводы о распределении метеоритов этого вида по химическому составу. Вместе с тем по составу и особенно по количеству никелистого железа мезосидериты, повидимому, входят в основном в одну группу. Судя по содержанию никеля в металлической части, они скорее могут отвечать II группе железных метеоритов. Возможно также, что мезосидерит Bencubbin, выделяющийся из общего числа пониженным содержанием FeO (7%) в силикате и Ni (5,8%) — в металле, наряду с большим количеством (70%) никелистого железа (также закономерность Прайора?), принадлежит к I группе.

Основная масса мезосидеритов содержит никелистое железо в пределах от 40 до 50%, т. е. в меньшем количестве, чем соответствующая II группа палласитов.

Другие типы смешанных метеоритов — сидерофилы (Steinbach) и лодраниты (Lodran), учитывая их состав и структуру, можно отнести к промежуточному виду между палласитами и мезосидеритами. Так, например, сидерофил по своему химическому составу очень близок к мезосидеритам, но имеет палласитовую структуру, а лодранит, имея промежуточный состав между палласитами и мезосидеритами, показывает тонкую структуру, сходную с палласитовой.

Особое место занимают грахамиты, также представленные одним метеоритом (Нечаево), которые по составу силиката и заключенных в нем зерен никелистого железа близки к метеоритам IV группы, в то время, как их металлическая часть содержит пониженное количество никеля.

Следующим видом метеоритов являются хондриты, которые состав-

ляют основное количество всех каменных метеоритов. Однако, несмотря на значительное число хондритов, мы не располагаем и в этом случае полными данными относительно их химического состава, так как большая часть анализов хондритов содержит те или иные ошибки. Юри

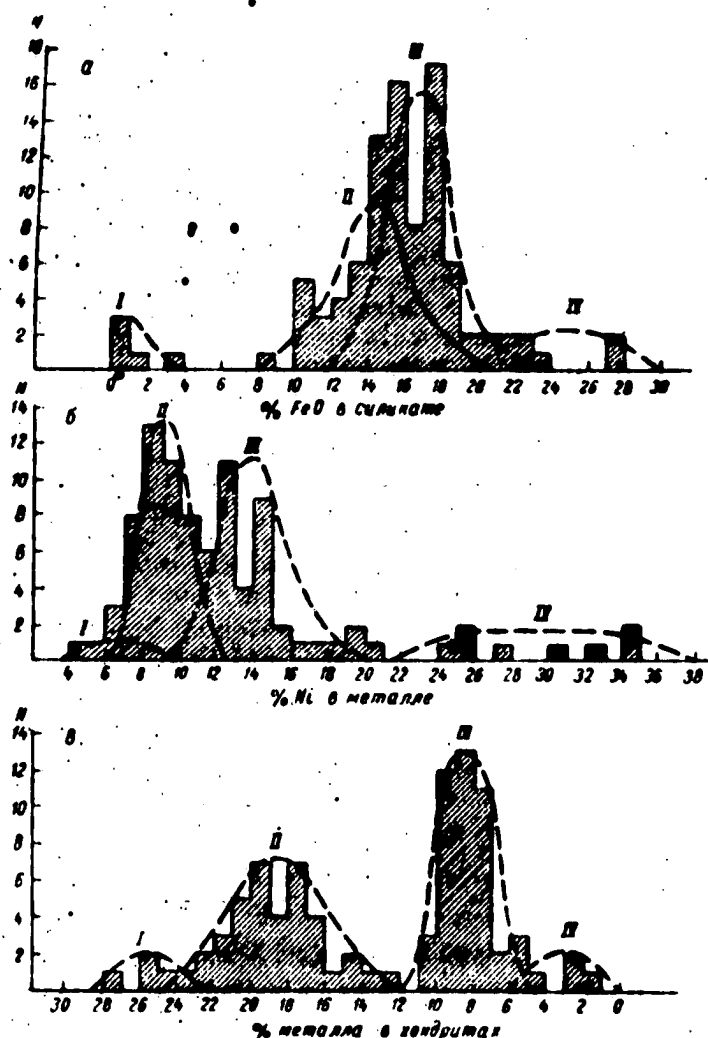


Рис. 4. Распределение хондритов по содержанию FeO, Ni и металлов.

и Крейгу [8] в итоге весьма кропотливой работы удалось выбрать из всего числа анализов 93 * наиболее достоверных результата, к которым мы прибавили еще 6, полученных в последнее время.

Всего таким образом в настоящей работе были использованы данные о химическом составе 99 хондритов.

Гистограммы состава хондритов представлены на рис. 4, где содержание всех выбранных составляющих отмечалось через каждый процент.

Как видно из этих графиков, хондриты по химическому составу можно разделить на 4 группы. В I группу входят 5, во II группу — 39, в III груп-

* Юри и Крейг приводят данные о 94 хондритах, но один из них (Вашлювка) относится к ахондритам.

пу — 50 и в IV группу — 5 хондритов. Наиболее отчетливо они отличаются по количеству никелистого железа, причем на соответствующем графике можно отметить четыре максимума — при 25,5, 18,5, 8,5 и 3%. На аналогичном графике, построенном Брауном и Паттерсон [6] для 184 каменных метеоритов, также намечаются отдельные максимумы, близкие к указанным выше; на их графике последний максимум (0—2% металла) значительно выше, так как эти авторы привели данные анализов не только хондритов, но и ахондритов, отличающихся малым количеством никелистого железа.

Если для каждой из этих четырех групп найти распределение хондритов по содержанию FeO в силикате, а затем нанести полученные кривые на общий график, то получится картина, представленная на рис. 4, а с максимумами — 1, 14, 17 и 25% FeO. Аналогичным путем получаем график распределения хондритов по содержанию никеля в никелистом железе, который также дает максимумы или средние значения при 6,5, 9, 14 и 30% Ni. Сравнив этот график с гистограммой состава железных метеоритов (рис. 1), можно и в данном случае увидеть известное соответствие найденных групп хондритов первым четырем группам железных метеоритов. Сопоставление всех трех графиков между собой будет произведено ниже, а сейчас следует заметить, что эти графики позволяют производить однозначное разделение всех хондритов на группы. Так, например, группа I, наряду с разницей в количестве металла, резко отличается от остальных по содержанию FeO, а группа IV четко выделяется по концентрации Ni в никелистом железе.

Определенные таким образом группы оказались близкими к четырем группам хондритов: типа Hvittis, Cronstad, Baroti и Soko-Banja, выделенным Прайором в его первой классификации [7].

С другой стороны, Валь [9] также разделил хондриты на четыре характерные группы, из которых одна представляет естественную, по его выражению, группу белых хондритов, а три других отличаются от нее содержанием FeO и никелистого железа. И в данном случае обнаруживается большое сходство этих групп с найденными нами группами хондритов.

Наконец, Юри и Крейг [8] в своей работе нашли две группы хондритов, отличающиеся между собой общим содержанием Fe. Если сопоставить их группы с указанными выше, то выясняется, что хондриты с высоким содержанием Fe (группа H по Юри и Крейгу) включают в себя первые две группы, а хондриты с низким содержанием Fe (группа L) — вторые две группы. Далее Юри и Крейг выделили из них еще две малочисленные группы — [H] и [L], которые оказались соответствующими нашим I и IV группам. Таким образом, и по выводам этих авторов хондриты можно разделить на четыре группы.

Все эти результаты подтверждают правильность нашего заключения о разделении хондритов на определенные группы.

Переходя к закономерности состава этих групп, которую можно проследить на приведенных графиках, следует прежде всего отметить определенную последовательность в изменении количества FeO, Ni и никелистого железа в отдельных группах. А именно, при переходе от одной группы хондритов к другой увеличивается среднее содержание FeO в силикате и Ni в металле и уменьшается количество металлической фазы.

Как указывалось, связь между этими величинами в хондритах была обнаружена Прайором и носит название «закона» или, вернее, закономерности Прайора. Эту закономерность можно наглядно представить в виде графика, на осях которого отложены две из указанных выше величин — процент никелистого железа в хондритах и процент никеля в металле (рис. 5), так как эти характеристики наиболее отчетливо выражают данную связь.

Если соединить точки, отвечающие средним значениям процента Fe — Ni и процента Ni в различных группах хондритов, плавной кривой, мы получим общее выражение этой зависимости. Однако, если на тот же график нанести среднее содержание Ni в металле отдельных хондритов, отличающихся по содержанию в них никелистого железа, вместо плавной кривой получится четыре, грубо говоря, горизонтальные ступеньки, отвечающие отдельным группам хондритов. Отсюда можно сделать вывод, что закономерность Прайора обнаруживается лишь при рассмотрении хондритов в целом, когда между собой сравниваются их различные группы. В пределах же одной группы эта закономерность не имеет места, так как состав никелистого железа не зависит от его количества в хондритах данной группы.

Из всего этого следует, что сомнения, высказанные некоторыми авторами [8] по поводу существования закономерности Прайора, в определенной степени подтвердились. Однако одновременно обнаруживается закономерность другого рода, которая в отличие от предположения Прайора [17], имеет не непрерывный, а дискретный характер, что связано с наличием определенных групп метеоритов, отличающихся по химическому составу. Эта закономерность, которую можно назвать «групповой» закономерностью Прайора, наблюдается не только у хондритов, но также у палласитов и мезосидеритов.

В результате этих данных можно сделать предположение, что вещество, из которого образовались метеориты, в своем развитии прошло, по крайней мере, две стадии. В первой стадии происходила дифференциация вещества перед его разделением на группы, которая сопровождалась изменениями качественного состава фаз, связанного с изменением их количественного соотношения. Указанный процесс иногда объясняется переходом в FeO большей или меньшей части металлического железа в зависимости от количества остаточного кислорода. Это должно было приводить как к изменению количества силикатной фазы за счет металлической, так и к вариациям содержания FeO в силикате и относительной концентрации никеля в металле. К этому следует добавить, что кроме кислорода здесь имело значение и различие в общем содержании Fe в отдельных группах. Так, в группе I хондритов содержится 29,4%, в группе II — 28,7%, в группе III — 22,4% и в группе IV — 21,8% Fe. Как видно из этих цифр, общее содержание Fe в хондритах уменьшается при переходе от группы I к группе IV, а то есть как количество FeO, наоборот, увеличивается. Это расхождение усугубляет разницу в составе и соотношения фаз.

Общие закономерности процесса дифференциации вещества по составу в этой стадии и отражает «закон» Прайора.

Во второй стадии, протекавшей после разделения на группы, если и происходила дифференциация вещества внутри каждой группы, то в отличие от предыдущего случая средний состав фаз здесь уже не обуславливался их количеством, несмотря на довольно большие колебания этих величин. В результате этого закономерность Прайора в отдельных группах не наблюдается. Это указывает на существенную разницу в условиях протекания данного процесса в обоих случаях, возможно даже на различное фазовое состояние вещества в стадиях I и II.

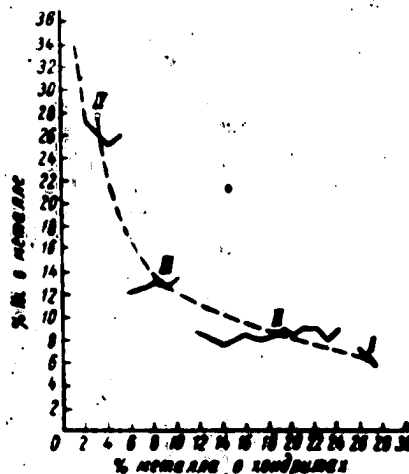


Рис. 3. Зависимость состава никелистого железа от количества металла в хондритах

FOR OFFICIAL USE ONLY

Если каждую группу метеоритов связывать с отдельной планетой, как это было сделано ранее [4], то можно предположить, что стадия I — до разделения на группы — соответствует периоду, предшествовавшему образованию планет. Таким образом, «групповая» закономерность Прайора должна отражать процессы, происходившие в протопланетной материи, где вещество, повидимому, находилось в газовой-пылевой состоянии, способствовавшем более активному взаимодействию отдельных химических элементов и их соединений.

Возвращаясь к составу хондритов, следует отметить среди них небольшую группу метеоритов, несколько отличного состава — углистых хондритов.

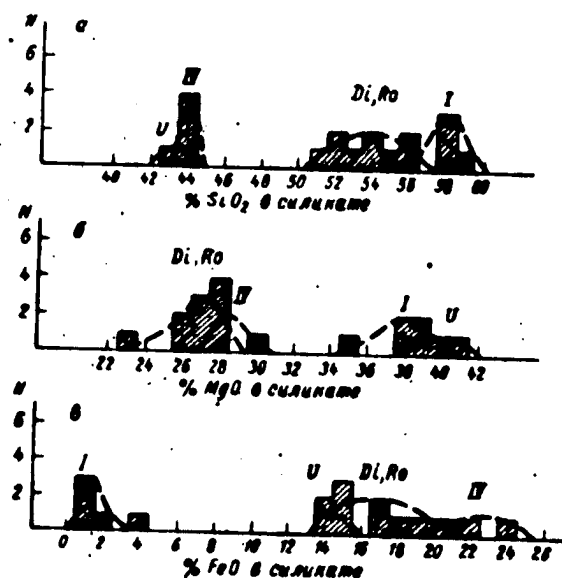


Рис. 6. Распределение ахондритов, бедных кальцием, по содержанию SiO_2 , MgO и FeO
U—урейлиты, Di—диогениты, Ro—родиты

По своему составу они могут быть разделены в первом приближении на три типа: Orgueil Миген и Felix*. Различие между этими типами видно также по данным Боято [11] об изотопном составе водорода и углерода в углистых хондритах и по содержанию в них натрия и калия, определенному Эдуардсом [10].

По концентрации никеля в никелистом железе (25—35%) метеориты типа Миген, нанесенные черными клетками на график (рис. 4б), соответствуют хондритам IV группы. Принадлежность углистых хондритов остальных типов к определенным группам метеоритов можно будет установить после изучения состава их металлической части.

Следующим видом метеоритов, который примыкает к хондритам, являются ахондриты, бедные кальцием. Данные о химическом составе 17 ахондритов этого типа, взятые главным образом из сводки Юри и Крейга [8], приведены на графиках (рис. 6). Для более полной характеристики состава этих метеоритов, имеющих малые примеси металла, графически представлено содержание всех основных составляющих их силикатной части — SiO_2 , MgO и FeO .

* Повидимому аналогичное разделение углистых хондритов по их составу произведено Винком, о чем упоминает Эдуардс [10].

По этим данным беднокальциевые ахондриты можно разделить на 4 группы, имеющие следующий средний состав силиката (по возрастанию содержания FeO):

- I. SiO_2 — 58%; MgO — 38%; FeO — 1%
- II. SiO_2 — 44%; MgO — 40%; FeO — 14%
- III. SiO_2 — 53%; MgO — 27%; FeO — 17%
- IV. SiO_2 — 44%; MgO — 29%; FeO — 22%.

В группу I входят энстатитовые ахондриты — обриты*. Группу II составляют урсилиты, содержащие в качестве характерной примеси небольшое количество углерода. Группа III состоит из ахондритов двух видов — диогенитов и родитов, имеющих идентичный химический состав. Заметим, кстати, что на близость состава ахондрита Roda к составу диогенитов указывал также Валь [9]. Отсюда следует, между прочим, что родиты скорее нужно отнести не к амфотеритам, как это сделано в классификации Прайора [2], а к группе диогенитов. К группе IV относятся амфотериты и, повидному, также шассиниты. Здесь обращает на себя внимание большое сходство состава амфотеритов и хондритов группы IV.

Содержание Ni в никелистом железе известно лишь для нескольких ахондритов. Можно говорить более определенно о составе никелистого железа в обритах, где оно в среднем для трех метеоритов (кроме Bishopville) составляет 5,6%, что соответствует группе I железных метеоритов, и в амфотеритах (также для трех ахондритов), где процент никеля колеблется от 27 до 33, что отвечает группе IV железных метеоритов. Что касается урсилитов и диогенитов, то здесь надежные данные о составе никелистого железа вообще отсутствуют, что не дает возможности по этому признаку их отнести к той или иной группе. Вместе с тем по содержанию FeO они занимают промежуточное положение между группами I и IV.

Из данных о количестве никелистого железа в ахондритах трудно заметить какое-либо последовательное изменение этой величины при переходе от одной группы ахондритов к другой. На основании весьма ограниченного числа анализов можно считать, что обриты содержат от 0,2 до 9%, урсилиты — 5—9%, диогениты — до 1% и амфотериты — ~ 3% никелистого железа.

Таким образом, по имеющимся материалам о содержании FeO в силикате, Ni — в металле и никелистого железа — в беднокальциевых ахондритах, можно сделать предварительное заключение, что закономерность Прайора в них не обнаруживается, хотя дальнейшие исследования состава метеоритов этого вида помогут более определенно решить этот вопрос.

Если этот вывод подтвердится, то возможной причиной его объяснения, повидному, являются значительные вторичные изменения состава ахондритов, которые могли затухивать первоначальные закономерности их состава.

Наконец последним видом метеоритов, содержащим весьма незначительные примеси никелистого железа (до 1%), являются ахондриты, богатые кальцием, названные так вследствие того, что они отличаются высоким содержанием CaO. Как и в предыдущем случае, их состав характеризуется содержанием основных составляющих силикатной части — SiO_2 , MgO , FeO , а также Al_2O_3 и CaO. Данные о составе 25 ахондритов этого вида, собранные Юри и Крейгом [8], пред-

* Здесь и в дальнейшем, если отсутствуют специальные оговорки, названия типов ахондритов приводятся по терминологии Прайора [2].

ставлены на графике (рис. 7); из него видно, что богатые кальцием ахондриты состоят из нескольких групп, существенно отличающихся своим основным химическим составом. Закономерную последовательность групп здесь определить трудно за отсутствием данных о составе никелистого железа, поэтому мы опишем их в порядке распространенности. Самая большая группа имеет следующий средний состав силиката: SiO_2 — 49%; MgO — 8%; FeO — 18%; Al_2O_3 — 13%; CaO — 10%. В эту

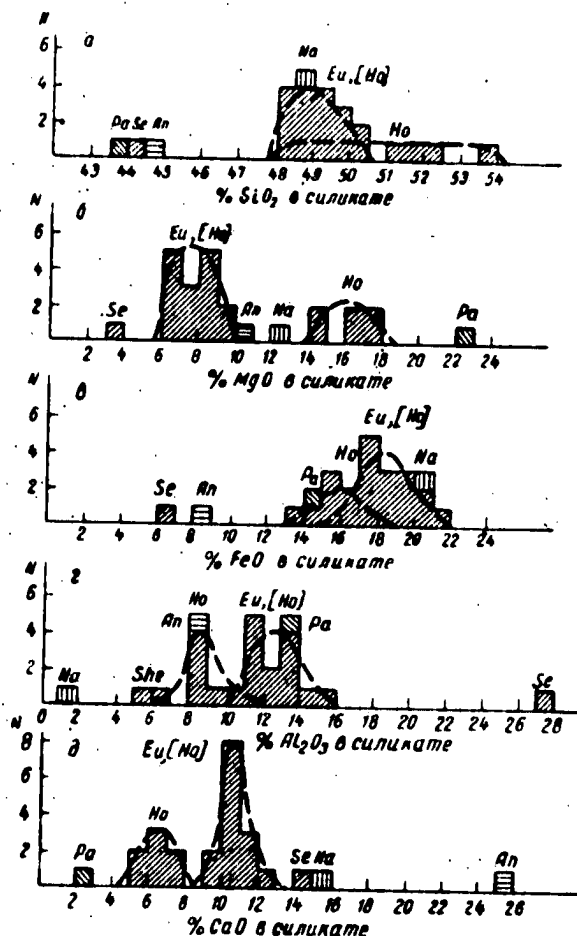


Рис. 7. Распределение ахондритов, богатых кальцием, по содержанию SiO_2 , MgO , FeO , Al_2O_3 и CaO :

Eu — эвкриты; She — шерготтиты; No — говардиты; An — ангриты; Na — наклиты; [Na] — говардитовые эвкриты; Se — Serra de Magé; Pa — Pampa del Infierno

группу входят эвкриты и часть говардитов. Сюда, помимо этого, можно отнести также шерготтит Shergotty, отличающийся лишь пониженным содержанием Al_2O_3 (5,9%).

Следующая группа, состоящая из остальной части говардитов (и эвкритов? Binda), содержит: SiO_2 — 51%; MgO — 16%; FeO — 16%; Al_2O_3 — 9%; CaO — 7%.

Как видно из этих данных, говардиты, в действительности, принадлежат к двум различным группам, одна из которых по составу близка к эвкритам. Поэтому последнюю группу говардитов правильнее будет

называть говардитовыми эвкритами; к ней принадлежат, например, такие ахондриты, как Luotolax, Pasamonte, Petersburg.

Остальные группы богатых кальцием ахондритов представлены отдельными метеоритами: ангритом Angra dos Reis, который в силикате содержит: SiO_2 —45%; MgO —10%; FeO —9%; Al_2O_3 —9%; CaO —25%, наклитом Nakhla, содержащим SiO_2 —49%; MgO —12%; FeO —21%; Al_2O_3 —2%; CaO —15%, а также эвкритом Serra de Magé, выделяющимся среди остальных эвкритов своим составом — SiO_2 —44%; MgO —3%; FeO —7%; Al_2O_3 —27%; CaO —15%. Мы здесь не говорим об образце Alsthananga, метеоритное происхождение которого считается сомнительным, приближающимся по составу к типичному габбро (с троилитом?).

Кроме того, известен говардит Pampa del Infierno со специфическим составом (SiO_2 —43%; MgO —22%; FeO —14%; Al_2O_3 —13%; CaO —3% в силикате), отличающийся от остальных ахондритов, богатых Ca, повышенным количеством никелистого железа и пониженным содержанием CaO, что скорее ставит его в промежуточное положение между этими и беднокальциевыми ахондритами. По содержанию никеля в металле (~12% Ni) этот метеорит соответствует группе II или III железных метеоритов.

Что же касается всех ахондритов, богатых кальцием, то, чтобы сопоставить их отдельные группы с остальными метеоритами, необходимо иметь данные о составе содержащегося в них никелистого железа. Вместе с тем можно заметить, что имеющиеся анализы эвкритов и говардитов показывают лишь следы никеля в пробах, содержащих десятки доли процента железа*. Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что эти метеориты не могут принадлежать к группе, соответствующей железному метеориту Oktibbeha (как считал Прайор [2]), содержащему никеля больше, чем железа, а скорее отвечают первым группам, имеющим меньшее количество никеля. Это косвенно подтверждается также составом никелистого железа говардита Pampa del Infierno.

Как указывалось ранее, ахондриты, богатые кальцием, впервые были выделены Прайором в отдельную группу, которая примыкала к ахондритам, бедным кальцием, со стороны амфотеритов, т. е., по существу, являлась продолжением этого класса ахондритов. Однако приведенные выше данные не согласуются с этими выводами Прайора и заставляют предполагать, что ахондриты, богатые кальцием, должны занимать такое же место по отношению к беднокальциевым ахондритам, как эти последние — по отношению к хондритам, т. е. находиться не рядом, а над ними.

Подводя итог рассмотрению отдельных видов метеоритов, следует указать, что между ними существует определенная связь, которую наиболее отчетливо можно проследить благодаря присутствию в них никелистого железа. С одной стороны, изменение количества никелистого железа в метеоритах означает переход от каменных метеоритов к железным через промежуточные виды. Если же к этому добавить сопоставление состава никелистого железа (по содержанию никеля) в отдельных видах метеоритов, то их генетическая связь выявится еще более резко. Соотношение между отдельными видами метеоритов поэтому наглядно может быть представлено на графике, где на оси ординат отложен процент никелистого железа в метеоритах, а на оси абсцисс — процент никеля в металле.

Соответствующий график представлен на рис. 8; точки на нем отвечают средним значениям величин, отложенных на осях, для отдельных групп метеоритов различных видов. Максимальный разбег указанных величин показан в виде отрезков, однако, как это было видно на графиках

* Никелистому железу говардита Жмени была неправильно заранее приписана формула Fe_3Ni , по которой было вычислено содержание никеля (0,11%), приведенное Юри и Крейгом [8].

ках рисунков 2, 3, 4, вероятное отклонение их от среднего значения существенно меньше.

Ввиду отсутствия данных о составе никелистого железа в урегилитах и диогенитах, для них условно принят процент Ni, соответствующий группам II и III. По той же причине ахондриты, богатые кальцием, условно показаны в виде горизонтальной прямой, близкой к нулевому содержанию никелистого железа и расположенной в интервале концентраций Ni в металле первых четырех групп метеоритов.

Точки, соответствующие каждому виду метеоритов, соединены пунктирными линиями, которые наглядно показывают зависимость между

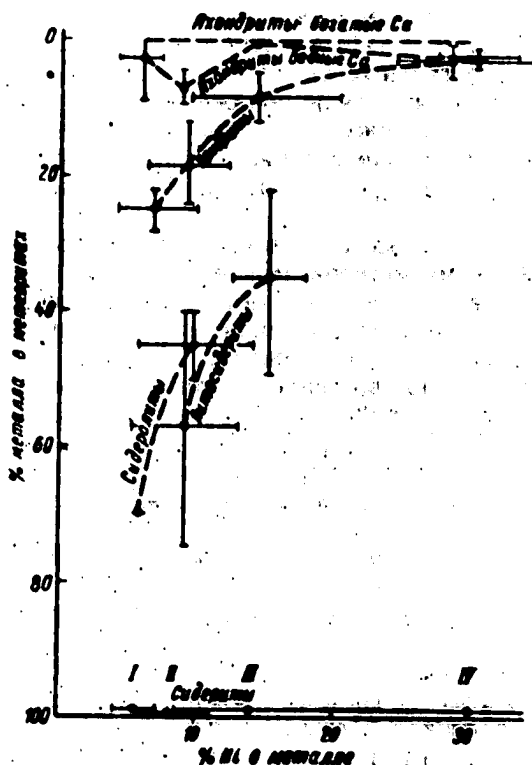


Рис. 8. Зависимость между содержанием Ni в металле и количеством металла в метеоритах различных видов

составом и количеством никелистого железа, в частности наличие «групповой» закономерности Прайора в хондритах и, как видно, в палласитах и мезосидеритах.

Из общего рассмотрения графика 8 следует, что все 6 видов метеоритов достаточно четко отличаются друг от друга по содержанию никелистого железа, не говоря о других существенных отличиях в составе, о чем говорилось выше; вместе с тем в них можно наблюдать известную периодичность в отношении состава никелистого железа. Все это дает основание выделить из числа трех основных классов метеоритов — каменных, железо-каменных и железных — указанные виды, а именно: 1) ахондриты, богатые кальцием; 2) ахондриты, бедные кальцием; 3) хондриты; 4) сидеролиты; 5) литосидериты; 6) сидериты в качестве подклассов.

Этим мы хотим подчеркнуть прежде всего

основной принцип разделения метеоритов на подклассы по химическому свойству, которое должно отвечать условиям периодичности. С этой точки зрения железные метеориты нельзя делить на подклассы, как делали это многие авторы. С другой стороны, различные подклассы метеоритов по содержанию никеля в металле делятся на отдельные части, принадлежащие к определенным группам, как это было показано ранее [4] и подтверждено в настоящей работе, что также видно на графике (рис. 8). Соответствие состава никелистого железа в различных подклассах каждой группы указывает на их генетическую связь и заставляет рассматривать данную группу в отдельности как самостоятельное целое. Обращаем здесь внимание на тот факт, что как деление на подклассы, так и на группы является условным, а следует из наблюдаемых закономерных различий в составе метеоритов. Отсюда следует далее естественное разделение подклассов по группам на семейства, каждое из которых объединяет метеориты сходного химического состава. Таким образом, рассмотренные выше отдельные группы метеоритов различных подклассов соответ-

ствуют по этой терминологии отдельным семействам. Произведенное разделение метеоритов по химическому составу на классы, подклассы, группы и семейства и их систематизация представляют собой основу классификации метеоритов, которая схематически представлена на рис. 9. Эта классификация по своему построению оказалась в значительной степени близкой к классификации Прайора (рис. 9.6), отличаясь от нее главным образом тем, что ахондриты, богатые кальцием, и сидеролиты выделены в отдельные подклассы, благодаря чему общее число последних возросло с 4 до 6, а также увеличилось число групп с 4 до 5.

Это отличие обусловлено в основном тем, что при разделении на подклассы и группы мы исходили из реальных различий в химическом составе метеоритов и наблюдаемых при этом закономерностей, в то время

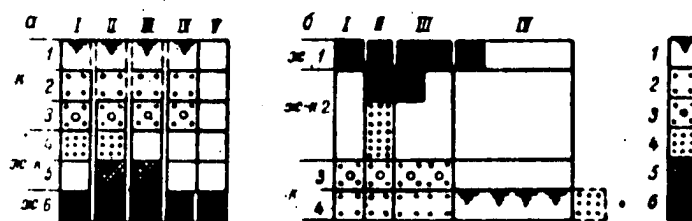


Рис. 9. Схемы классификаций метеоритов

Классы: к — каменные; ж-к — железо-каменные; ж — железные; подклассы: 1 — ахондриты, богатые Са; 2 — ахондриты, бедные Са; 3 — хондриты; 4 — сидеролиты; 5 — литосидериты; 6 — сидериты группы: I, II, III, IV, V.

как Прайор считал границы между отдельными подразделениями условными и не придавал поэтому значения их числу.

На основе этой классификации по химическому составу метеориты должны далее подразделяться по минеральному составу. Для этого следует рассмотреть различие минерального состава внутри каждого семейства, на основании чего это семейство может быть разделено на типы.

Следующим признаком, по которому должна происходить дальнейшая классификация определенных таким образом типов метеоритов (на подтипы), является их структура.

Необходимо отметить, что благодаря разделению метеоритов на группы, отдельные подклассы почти не налагаются друг на друга по содержанию никелистого железа, что особенно наглядно видно из рис. 8.

Таким образом, хондриты, содержащие до 28% металла, и палласиты, имеющие его менее 25%; однако, ввиду того что они оказываются в различных группах, т. е. в разных местах, можно ожидать, что там имелись и различные условия, которые привели к такому отличию их структур.

Если же рассматривать отдельные группы, то между смежными семействами можно наблюдать различные переходные формы. О существовании между мезосидеритами и палласитами группы II промежуточной формы в виде сидерофиров и лодранитов мы уже говорили выше. Обречия и эвстатитовые хондриты группы I обнаруживают непосредственную связь благодаря наличию так называемых кумберлендитов, состоящих из фрагментов обоих типов — полимиктовой брекчии по Валу [12]. Встречаются переходные формы и между палласитами и сидеритами, например палласит Wrenham. С другой стороны, ряд железных метеоритов имеет большое количество силикатных включений.

Дальнейшее изучение химического состава метеоритов должно уточнить предлагаемую классификацию прежде всего в отношении места некоторых ахондритов, а также дополнить ее новыми данными. Большую помощь в классификации могут оказать работы по определению рассеянных элементов в метеоритах, так как при этом также выявляются определенные закономерности состава метеоритного вещества [13].

В заключение нужно сказать несколько слов о терминологии для обозначения отдельных типов метеоритов, что тесно связано с основным вопросом классификации метеоритов. Принятие единой системы классификации и унифицированной терминологии будет, повидимому, решаться Международной метеоритной комиссией. До этого времени мы предлагаем бы сохранить без изменений терминологию Бржезины-Прайора, как наиболее распространенную в настоящее время. Вместе с тем, чтобы отразить основные выводы настоящей работы, было бы целесообразно к названию типа метеорита по указанной терминологии добавлять номер группы метеоритов по нашей схеме. Например «октаэдрит грубоструктурный, группы II», или «хондрит шариковый, белый, группы III» и т. д. Это даст возможность легко производить сравнение различных типов метеоритов между собой.

Настоящая работа имела своей целью дать основные положения классификации метеоритов по вещественному составу и представить общую схему такой классификации. Ввиду сложности этого вопроса здесь, естественно, неизбежны недостатки. За указание этих недостатков автор будет весьма благодарен.

ВЫВОДЫ

1. Из рассмотрения общих принципов классификации метеоритов по вещественному составу выясняется необходимость в качестве первоначального признака классификации выбрать химический состав.
2. Среди различных классификаций метеоритов наиболее правильной, с этой точки зрения, является классификация Прайора, которая вместе с тем нуждается в дальнейшем совершенствовании.
3. Наличие определенных закономерностей в химическом составе метеоритов позволяет произвести разделение метеоритов всех трех классов на 6 подклассов и 5 групп, что может служить основой для классификации метеоритов.
4. В результате учета минералогических, петрографических и металлографических признаков определяется схема классификации метеоритов по химико-минеральному составу и структуре.
5. На основании некоторых закономерностей в химическом составе («групповая» закономерность Прайора и др.) и структуре метеоритов можно высказать отдельные предположения, касающиеся проблемы происхождения метеоритов.

Поступила в редакцию
18.1. 1956

ЛИТЕРАТУРА

1. Brezina A., The arrangement of collections of meteorites, Proc. Am. Phil. Soc. 43, 211 (1904).
2. Prior G. T., The classification of meteorites, Mineral. Mag. 18, 51 (1920).
3. Заварицкий А. Н. и Кваша Л. Г., Метеориты СССР, ч. I, М., 1952.
4. Явнель А. А., Закономерности состава железных метеоритов и проблема происхождения метеоритов, ДАН, 102, 477 (1955).
5. Prior G. T., Hey M. H., Catalogue of meteorites, London (1953).
6. Brown H. S., Patterson C., The composition of meteoritic matter, J. Geol. 55, 508 (1917); 56, 85 (1948).
7. Prior G. T., On the genetic relationship and classification of meteorites, Mineral. Mag. 18, 26 (1916).
8. Levy H. C., Craig H., The composition of the stone meteorites and the origin of the meteorites, Geochim. et cosmochim. acta 4, 36 (1953).
9. Wahl W., The statement of chemical analyses of stony meteorites and the interpretation of the analyses in terms of minerals, Mineral. Mag. 29, 416 (1950).
10. Edwards G., Sodium and potassium in meteorites, Geochim. et cosmochim. acta 6, 285 (1955).
11. Baur G., The isotopic composition of hydrogen and carbon in the carbonaceous chondrites, Geochim. et cosmochim. acta 6, 209 (1954).
12. Wahl W., The brecciated stony meteorites and meteorites containing foreign fragments, Geochim. et cosmochim. acta 2, 91 (1952).
13. Goldberg E., Uchiyama A., Brown H., The distribution of nickel, cobalt, gallium, palladium and gold in iron meteorites, Geochim. et cosmochim. acta 2, 1 (1951).

FOR OFFICIAL USE ONLY

Д О К Л А Д Ы

АКАДЕМИИ НАУК СССР

1960

Tom 181, № 5

FOR OFFICIAL USE ONLY

Доклады Академии наук СССР
1960. Том 131, № 5

АСТРОНОМИЯ

А. А. ЯВНЕЛЬ

**К ВОПРОСУ О ЗАВИСИМОСТИ СТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНЫХ
МЕТЕОРИТОВ ОТ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА**

(Представлено академиком В. Г. Фесенковым 25 XII 1959)

Железные метеориты, представляющие собой в основном железо-никелевый сплав с содержанием от 4 до 60% Ni, имеют характерную структуру, определяемую химическим составом и условиями кристаллизации их вещества. Метеориты с содержанием никеля до ~6% состоят из α -фазы и имеют крупнокристаллическую, большей частью монокристаллическую, структуру и называются гексаэдритами (H). Метеориты с большим содержанием никеля являются двухфазными ($\alpha + \gamma$ -фазы) и имеют либо вид камаситовой структуры с различной шириной балок α -фазы (камасита) — октаэдриты (O), либо мелкозернистую структуру — атакситы, богатые никелем (Ds). В свою очередь, октаэдриты по ширине камаситовых балок (d) разделяются на несколько структурных типов, границы между которыми являются условными. Обычно производится разделение октаэдритов на пять типов: весьма грубоструктурные (Ogg) — $d > 2,5$ мм, грубоструктурные (Og) — $d \approx 1,5-2,0$ мм, среднеструктурные (Om) — $d \approx 0,5-1,0$ мм, тонкоструктурные (Of) — $d \approx 0,15-0,4$ мм и весьма тонкоструктурные (Off) — $d \approx 0,05-0,10$ мм.

Общая связь между структурой железных метеоритов и содержанием никеля известна давно. П. Н. Чирвинский⁽¹⁾, а затем Бадхью⁽²⁾ вычислили среднее содержание никеля в железных метеоритах различных типов, в результате чего выяснилось, что с повышением концентрации никеля структурные типы железных метеоритов образуют следующий ряд: H — Ogg — Og — Om — Of — Off — Ds. Перри⁽³⁾ и другие авторы представили интервалы концентраций никеля в октаэдритах различных типов.

С другой стороны, в последнее время Брауном с сотр.^(4,5) обнаружено, что железные метеориты по содержанию примесей галлия и германия делятся на четыре группы, состав которых приведен в подписи к рис. 2. Сопоставление железных метеоритов различных Ga — Ge-групп и структурных типов с содержанием в них никеля привело авторов^(4,5) лишь к выводу, что между этими тремя характеристиками нет определенной зависимости. Вместе с тем выяснение глубоких связей между составом и структурой железных метеоритов является одним из серьезных вопросов, необходимых для решения проблемы происхождения метеоритов.

В настоящей работе сделана попытка на основе имеющихся данных найти закономерные соотношения между составом, в частности содержанием никеля, а также галлия и германия, и структурой железных метеоритов, что могло бы дать ключ к дальнейшим исследованиям этого вопроса.

Для этого зависимость структуры (ширины камаситовых балок) железных метеоритов от содержания в них никеля была представлена графически (рис. 1). На графике приведены данные работ⁽¹⁻³⁾, причем ширина балок α -фазы в гексаэдритах показана вне масштаба. Сравнение этих данных, полученных на различном статистическом материале, свидетельствует о том,

так, несмотря на расхождение между средними цифрами работ (1) и (2), они находятся внутри интервала концентраций, найденного в работе (3). Расстояние полученного графика от нуля доказывает, что соотношение между структурой и содержанием никеля в железных метеоритах имеет вид широкой полосы, что свидетельствует о наличии общей, но неоднозначной связи между этими величинами. Эта полоса имеет, кроме того, довольно резкий перегиб в области тонкоструктурных скардритов.

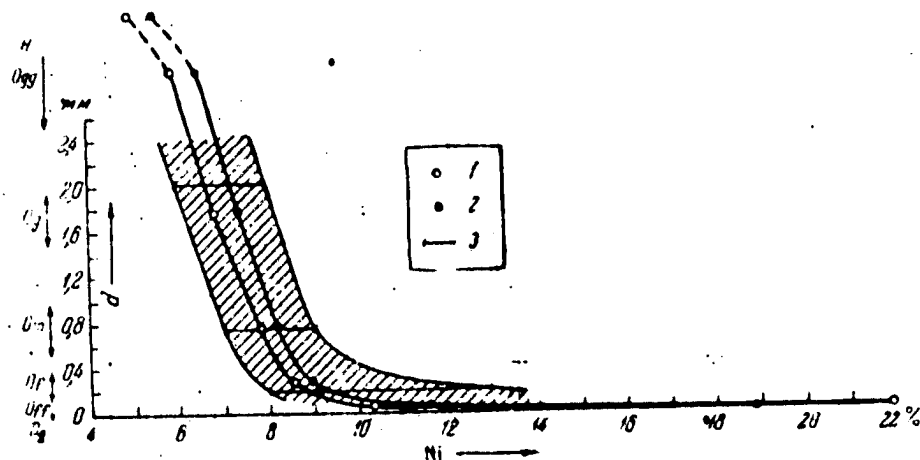


Рис. 1. Зависимость структуры железных метеоритов от содержания никеля 1 — Чирвинский (1922), 2 — Баджов (1946), 3 — Перри (1941)

Сложный вид этой зависимости привел нас к мысли, что найденная полоса в действительности может состоять из нескольких ветвей, представляющих собой различные Ga — Ge-группы железных метеоритов.

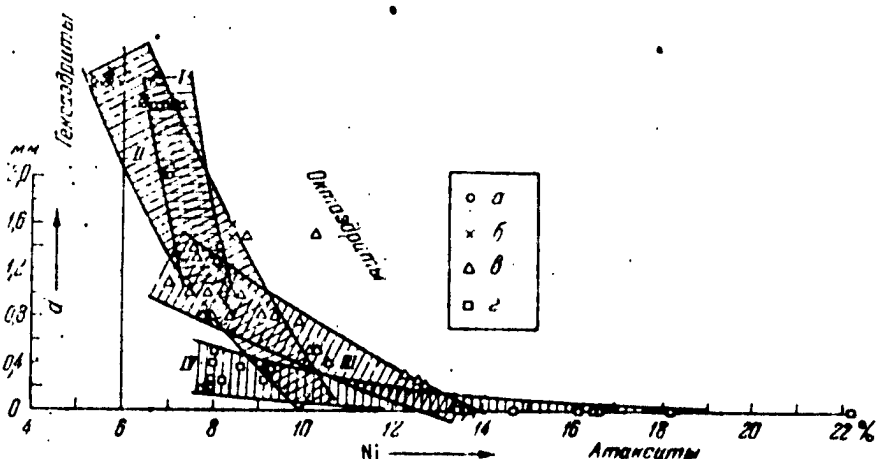


Рис. 2. Зависимость структуры железных метеоритов различных Ga — Ge-групп от содержания никеля. а — группа I, 80—100·10⁻⁴% Ga, 300—420·10⁻⁴% Ge; б — группа II, 40—65·10⁻⁴% Ga, 130—230·10⁻⁴% Ge; в — группа III, 8—24·10⁻⁴% Ga, 15—80·10⁻⁴% Ge; г — группа IV, 1—3·10⁻⁴% Ga, 1—10·10⁻⁴% Ge

Для проверки этого предположения был построен график в тех же координатах, на котором нанесены данные о ширине камаситовых балок и содержании никеля в метеоритах различных Ga — Ge-групп по результатам работ (4, 5). Полученный график, представленный на рис. 2, подтвердил указанное предположение. Как видно, зависимость ширины камаси-

товых балок железных метеоритов от содержания никеля представляет собой четыре полосы, соответствующие четырем Ga — Ge-группам, имеющие различный наклон и пересекающиеся друг с другом. В сумме эти четыре полосы дают картину, наблюдающуюся на рис. 1, и объясняют, в частности, причину отмеченного выше перегиба полосы.

Существенно отметить, что изменение наклона полос является закономерным, а именно с переходом от I Ga — Ge-группы к IV группе наклон по отношению к оси концентраций никеля последовательно уменьшается. Это означает, что железные метеориты, содержащие максимальные количества галлия и германия, показывают также максимальную зависимость ширины камаситовых балок от содержания никеля, в десятки раз превышающую подобную зависимость у метеоритов с минимальным содержанием этих элементов.

Такое резкое различие вряд ли можно объяснить влиянием мельчайших примесей галлия и германия на скорость роста кристаллов α -фазы, хотя примеры воздействия малых добавок отдельных элементов на структуру сплавов и известны. В данном случае такому предположению противоречит пересечение различных ветвей между собой, что означало бы противоположный характер влияния галлия и германия на ширину камаситовых балок при небольшом различии в содержании никеля в сплаве. Например, в сплаве с 8% Ni повышение содержания Ga и Ge «увеличивает» ширину балок α -фазы, а в сплаве с 10% Ni подобное же повышение концентрации этих элементов «уменьшает» указанную ширину. По-видимому, различная зависимость структуры от содержания Ni в метеоритах разных Ga — Ge-групп свидетельствует о неодинаковых условиях кристаллизации метеоритного железа этих групп. Поэтому различие в содержании галлия и германия, очевидно возникшее раньше, может служить лишь косвенным признаком разных условий образования структуры метеоритного вещества.

Можно полагать, что общий характер наклона кривых зависимости структуры от состава железных метеоритов в сторону больших концентраций никеля, по-видимому, связан с тем, что при повышении содержания никеля понижается температура начала превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ в системе Fe — Ni, а это приводит к замедлению диффузионных процессов. В то же время различия в наклоне этих кривых могут скорее всего зависеть от различных скорости охлаждения сплава, давления и других факторов. Неоднозначная зависимость структуры от состава, которая проявляется в различной структуре метеоритов, принадлежащих к одной и той же Ga — Ge-группе и имеющих одинаковое содержание никеля, по нашему мнению (*), может объясняться, например, фиксацией структуры сплава при его резком охлаждении с различных температур.

Выяснение всех этих вопросов требует дальнейшего целеустремленного изучения железных метеоритов. Одним из важных направлений в этих исследованиях может быть изучение состава фаз метеоритного железа методом локального рентгеноспектрального анализа (*). Можно полагать, что раскрытие различий в условиях кристаллизации метеоритов отдельных Ga — Ge-групп приведет также к выяснению их более ранней истории, в частности причин образования определенных уровней содержания галлия и германия, которые еще неясны.

В дополнение следует сказать, что из найденной зависимости структуры железных метеоритов от состава, в частности, следует, что граничная концентрация никеля для образования атакситов неодинакова у различных Ga — Ge-групп и у некоторых из них может быть значительно меньше 13% — значения, принятого для этой величины некоторыми авторами. Отсюда вытекает, что объяснения образования структуры железных метеоритов, основанные на этой предпосылке (*), требуют пересмотра.

Среди других частных выводов данной работы можно указать на следующие. Если спроектировать график рис. 2 на ось концентраций, то мы полу-

FOR OFFICIAL USE ONLY

чим кривую распределения железных метеоритов по содержанию никеля, имеющую максимумы, аналогичные найденным нами ранее ⁽⁹⁾. Рассмотрение этого вопроса показывает, что первая Ni-группа железных метеоритов (с резким максимумом 5,6% Ni) отвечает максимуму II Ga — Ge-группы, точнее, части этой группы с более низким содержанием данных элементов (40—60) · 10⁻⁴% Ga и * (130—165) · 10⁻⁴% Ge. II Ni-группа (с максимумом ~8% Ni) представляет собой наложение друг на друга максимумов III, IV и, частично, I Ga — Ge-групп. Таким образом выявляется более сложный характер этого распределения.

Если же спроектировать этот график на ось структур, то в местах наложения смежных Ga — Ge-групп также образуются максимумы. В результате этого обнаруживается сходство с данными авторов ⁽⁶⁾ о наличии трех максимумов в распределении железных метеоритов по ширине камаситовых балок. При этом грубоструктурные октаэдриты (по классификации, предлагаемой этими авторами) отвечают наложению ветвей I и II Ga — Ge-групп, среднеструктурные II и III, а тонкоструктурные III и IV. Отсюда следует, что разделение железных метеоритов по структуре лишь в какой-то мере отражает сложные закономерности, имеющиеся в их составе.

Комитет по метеоритам
Академии наук СССР

Поступило
25 XII 1959

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ П. Н. Чирвинский, Метеоритика, 5, 39 (1949); H. Michel, Fortsch. d. Min., Krist. u. Petr., 7, 294 (1922). ² J. D. Buddhue, Popul. Astron., 154, № 3, 149 (1946). ³ S. H. Perry, The Metallography of Meteoric Iron, Washington, 1944. ⁴ E. Goldberg, A. Uchiyama, H. Brown, Geochim. et cosmochim. acta, 2, № 1, 1 (1951). ⁵ J. F. Lovering, W. Nichiporuk, A. Chodos, H. Brown, Geochim. et cosmochim. acta, 11, № 4, 263 (1957). ⁶ А. А. Явнель, Астр. журн., 34, № 6, 921 (1957). ⁷ А. А. Явнель, И. Б. Боровский и др., ДАН, 123, № 2, 256 (1958). ⁸ H. N. Uhlig, Geochim. et cosmochim. acta, 6, № 5/6, 282 (1954). ⁹ А. А. Явнель, ДАН, 102, № 3, 477 (1955).

FOR OFFICIAL USE ONLY

Академия наук СССР
Астрономический журнал
Том XXXIV. Вып. 6
Ноябрь—декабрь 1957 г.

А. А. Явнель

**ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ
МЕТЕОРИТНОГО ВЕЩЕСТВА И ПРОИСХОЖДЕНИЕ МЕТЕОРИТОВ**

1957

А. А. ЯВНЕЛЬ

ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ
МЕТЕОРИТНОГО ВЕЩЕСТВА И ПРОИСХОЖДЕНИЕ МЕТЕОРИТОВ

Различия в минеральном составе метеоритов — изменение состава пироксенов и отношения оливина к пироксену в хондритах, соотношение камасита и таенита в железных метеоритах и т. д. объясняются закономерным изменением их химического состава.

Рассмотрение равновесной диаграммы состояния системы Fe—Ni показывает, что структура железных метеоритов образовалась при чрезвычайно медленном охлаждении железо-никелевых сплавов. Различное строение железных метеоритов одинакового состава является результатом фиксирования структур, образовавшихся при разных температурах (ниже 450°C) и давлениях (менее 10⁵ атм).

Структуры метеоритов, в том числе и их метаморфические изменения, возникли до момента раскола астероидов, в итоге сложной термической истории этих космических тел.

THE PECULIARITIES OF THE MINERALOGICAL COMPOSITION AND STRUCTURE OF METEORITIC MATTER AND THE ORIGIN OF METEORITES, by A. A. Yarnel. — The difference in the mineral contents of meteorites — the change of the composition of pyroxenes and the ratio of olivin to pyroxen in chondrites, the ratio of kamacite and taenite in iron meteorites, etc. — is explained by a regular change in their chemical composition.

The equilibrium diagram of the Fe—Ni system shows that the structure of iron meteorites was formed under very slow cooling of the iron-nickel alloys. The different structure of iron meteorites of identical composition is a result of the fixation of structures, formed at different temperatures (lower than 450° C) and pressure (less than 10⁵ atm).

The structure of meteorites, as well as their metamorphic variations, originated before the breaking up of asteroids, as a result of the complex thermal history of these cosmical bodies.

Основной минеральный состав метеоритов определяется их химическим составом, вследствие чего здесь также наблюдаются известные закономерности [1].

Ахондриты, богатые кальцием, отвечающие верхним слоям астероидов, состоят главным образом из алюмосиликатов в виде плагиоклаза — $m\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ и $n\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ и магнезидных силикатов в виде пироксена — $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ и, частично, оливина — $2(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O} \cdot \text{SiO}_2$.

Силикатная фаза ахондритов, бедных Са, хондритов и других подклассов метеоритов, находившихся в более глубоких слоях, состоит в основном из пироксена и оливина, с увеличением количества оливина (за счет повышения содержания MgO) в палласитах. При этом можно видеть закономерное изменение соотношения между пироксеном и оливином и их состава при переходе от I группы метеоритов к V, что особенно наглядно проявляется в хондритах.

В то время как силикатная фаза хондритов I группы полностью состоит из пироксена, в следующих группах постепенно повышается количество

оливин, являющегося в хондритах V группы (углистых) уже основным минералом. Одновременно с этим растет содержание FeO в указанных минералах — пироксен I группы представлен почти чистым энстатитом ($\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$), а IV группы — гиперстеном, содержащим выше 20% FeO.

Отсюда мы видим, что в хондритах соотношение между пироксеном и оливином, как и содержание в них железа, закономерно изменяется в широких пределах. Вследствие этого подсчет средних значений из этих величин, а тем более попытка представить эти средние в виде определенных молекулярных отношений, не имеет под собой оснований.

Таким образом приведенные в предыдущей статье [1] выводы Чирвинского (его I и II «законы») в действительности не отражают каких-либо закономерностей в химико-минеральном составе хондритов.

Закономерностью здесь являются не средние величины соотношения между пироксеном и оливином и количества в них железа, а систематическое изменение этих величин. Эта закономерность непосредственно вытекает из систематического повышения количества FeO при переходе от I группы метеоритов к V [1].

В результате увеличения FeO, естественно, растет его содержание в минералах силикатной фазы, где атомы Fe изоморфно замещают Mg в кристаллической решетке. Однако этим дело не исчерпывается. Как видно (из [1] рис. 4), соотношение между Mg и Si в различных группах достаточно постоянно, причем подсчет молекулярного отношения $\text{MgO} : \text{SiO}_2$ в хондритах показывает, что оно близко к единице. Это обстоятельство отметили также Браун и Паттерсон. Таким образом в отсутствие FeO сочетание этих окислов должно образовывать только пироксен, а именно энстатит, что и наблюдается в I группе.

С увеличением FeO молекулярное отношение $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O} : \text{SiO}_2$ начинает превышать единицу, вследствие чего, кроме пироксена, должно образоваться некоторое количество оливина, в котором это отношение равно двум. В итоге повышение содержания FeO приводит также к наблюдаемому изменению минерального состава хондритов.

Отсутствие в минералах, входящих в силикатную фазу метеоритов, высших окислов элементов, а также наличие таких минералов, как шрейберзит $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{P}$, свидетельствует об образовании метеоритного вещества в условиях недостатка кислорода. Это подтверждает правильность нашей предпосылки, принятой для объяснения «первичной» закономерности Прайора.

Минеральный состав металлической фазы также систематически изменяется при переходе от одной группы метеоритов к другой, что объясняется изменением количества никеля в никелистом железе.

Одновременно с этим вопросом целесообразно рассмотреть и тесно связанную с ним проблему образования структуры железных метеоритов.

Железные метеориты представляют собой сплав железа с никелем и небольшими примесями кобальта, фосфора и других элементов. Атомы никеля и кобальта замещают атомы железа в кристаллической решетке, образуя с ним твердые растворы с решетками двух форм: α -фаза или калмасит имеет объемноцентрированную кубическую решетку (рис. 1), а γ -фаза или таэнит — гранецентрированную кубическую решетку (рис. 2). Параметр решеток зависит от содержания никеля и кобальта в сплаве.

Большинство железных метеоритов из числа содержащих до 6% никеля представляют собой крупные кристаллы однофазного α -сплава и называются гексаэдритами, а остальные состоят из обеих фаз, образующих либо видманштеттову (точнее «видманштеттенову») структуру с октаэдритовым рисунком, вследствие чего называются октаэдритами, либо (небольшая часть) — мелкозернистую структуру и называются такситами.

Для объяснения фазового (минерального) состава и структуры железных метеоритов необходимо знать диаграмму состояния многокомпонент-

ной системы элементов, из которых состоят эти метеориты. В первом приближении обычно рассматривается диаграмма состояния системы железо—никель.

Эта система, изученная на искусственных железо-никелевых сплавах, имеет в области температур ниже 900° и при концентрации никеля до 30% аллотропические превращения твердого раствора с переходом γ -фазы в α фазу. Однако искусственные железо-никелевые сплавы, содержащие до 20% никеля, состоят из одной фазы, чем отличаются от метеоритного железа, которое, уже начиная с 6% никеля и выше, состоит из двух фаз (α и γ).

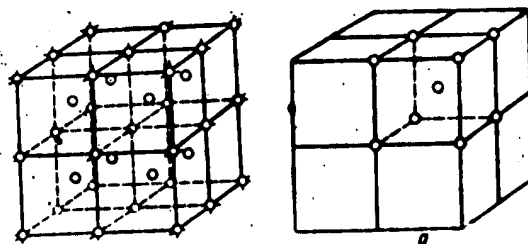


Рис. 1. Объемноцентрированная решетка (a — ячейка)

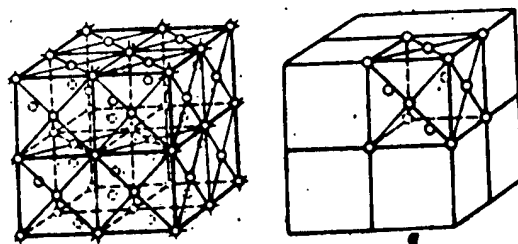


Рис. 2. Гранецентрированная решетка (a — ячейка)

Другое существенное отличие касается структуры, которая в искусственных сплавах является мелкокристаллической, в то время как в метеоритах наблюдается обратная картина. Строение гексаэдритов показывает наличие в них огромных монокристаллов α -фазы, а непрерывный рисунок видманштеттовой структуры в октаэдритах свидетельствует о крупнокристаллическом строении γ -фазы. Это, скорее всего, объясняется медленным охлаждением метеоритного железа как в области γ -фазы — при высоких температурах, так и в области α -фазы — при низких температурах.

Здесь необходимо заметить, что мнение Перри [2] о выделении кристалликов железо-никелевого фосфида вдоль контуров мелких γ -зерен является ошибочным. Как показал Юлиг, эти выделения сконцентрированы вдоль местных искажений α -решетки и не имеют отношения к кристаллизации γ -фазы. Отсюда неверен также основанный на утверждении Перри вывод автора [3] о сравнительно быстром первоначальном охлаждении вещества Сихотэ-Алинского железного метеорита.

Поэтому в свое время было высказано предположение о том, что метеоритное железо образовалось в равновесных условиях при очень медленном охлаждении; и его фазовый состав должен объясняться диаграммой равновесия Fe — Ni. В течение ряда лет делались попытки построить диаграмму равновесия Fe — Ni с эвтектидным превращением твердого γ -раствора, т. е. иного типа, чем обычная диаграмма состояния этой системы.

Одной из последних диаграмм этого типа была довольно сложная диаграмма Брэдли и Гольдшмидта [4], согласно которой интервал превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ составляет всего 230° (от 580 до 350°C). На этом основании Брэдли [5] высказал предположение, что однократное охлаждение сплава в этом узком температурном интервале не могло привести к образованию крупнокристаллической видманштеттовой структуры, вследствие чего структура железных метеоритов по Брэдли должна была образоваться при их повторяющемся нагреве не выше 580° в результате приближения к поверхности с последующим внезапным охлаждением ниже 350°C .

Иначе, если сплав хотя бы один раз нагрелся выше 580 или медленно охлаждался до температуры ниже 350°C , это привело бы, согласно диаграмме Брэдли и Гольдшмидта, к исчезновению полученной структуры, и весь процесс образования видманштеттовой структуры нужно было бы начинать сначала.

Не говоря уже о несостоятельности этой гипотезы с астрономической точки зрения, на что указывал Ватсон [6], диаграмма Брэдли и Гольдшмидта не подтвердилась более поздними исследованиями.

Прежде чем перейти к этим работам, можно, в качестве эпизода, упомянуть также другие необоснованные предположения о том, что видманштеттова структура в железных метеоритах обусловлена иными причинами, чем медленное охлаждение. Сливинский [7], например, полагал, что видманштеттова структура присуща только метеоритному железу и объясняется либо кристаллизацией его без азота и кислорода воздуха, либо наличием в нем каких-то мельчайших примесей, которые якобы не могут быть обнаружены. Вместе с тем видманштеттова структура хорошо известна в черных и цветных сплавах, в том числе и в сплавах $\text{Fe} - \text{Ni}$, но имеет микроскопические размеры, что связано со сравнительно быстрым охлаждением этих сплавов. К тому же на появление такой структуры никак не влияет то обстоятельство, проводилась ли плавка в вакууме или на воздухе.

Оуэн [8] предполагал, что метеориты, пролетая через земную атмосферу, прогреваются насквозь до очень высоких температур, вследствие чего наблюдаемая в них структура могла образоваться лишь при охлаждении после падения их на поверхность Земли. Однако всем, кто знаком с метеоритами, хорошо известно, что метеориты имеют очень тонкую кору плавления и прогорты с поверхности на весьма незначительную глубину. Поэтому работа Оуэна сразу же получила убедительное опровержение [9].

Возвращаясь к изложению основного вопроса, следует сказать, что наряду с диаграммами эвтектондного типа было предложено в качестве равновесных много диаграмм того же типа, что и неравновесная система $\text{Fe} - \text{Ni}$. В итоге тщательных экспериментальных исследований железо-никелевых сплавов Оуэн и Салли [10] получили для системы $\text{Fe} - \text{Ni}$ диаграмму равновесия, которая затем была уточнена Оуэном и Лиу [11] и продолжена в область более низких температур Лилем [12].

Эта диаграмма, приведенная на рис. 3, показывает прежде всего, что в условиях равновесия происходит лишь смещение линий превращения твердого раствора без изменения типа превращения. Таким образом различные диаграммы системы $\text{Fe} - \text{Ni}$ эвтектондного типа не подтверждались. В нижней части рис. 3 показано распределение железных метеоритов по содержанию никеля и разделенные их на группы.

Рассмотрение этой диаграммы позволяет представить общие черты образования фаз и структуры железных метеоритов.

Медленное охлаждение железо-никелевого сплава приводит к образованию очень крупных кристаллов γ -фазы. При достижении температуры начала перехода $\gamma \rightarrow \alpha$, соответствующей верхней линии на диаграмме (рис. 3), в сплаве появляется α -фаза, кристаллическая решетка которой ориентируется определенным образом к решетке γ -фазы: плоскость (110) α -фазы параллельна плоскости октаэдра (111) γ -фазы, а направление

[111] α -фазы — направлению [110] γ -фазы. При такой взаимной ориентировке в максимальной степени удовлетворяется условие структурного и размерного соответствия обеих решеток в момент перестройки. Таким образом возникает октаэдритовая — видманштеттова структура сплава.

Состав первых зародышей α -фазы определяется температурой начала превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ (зависящей от концентрации Ni в сплаве) и находится

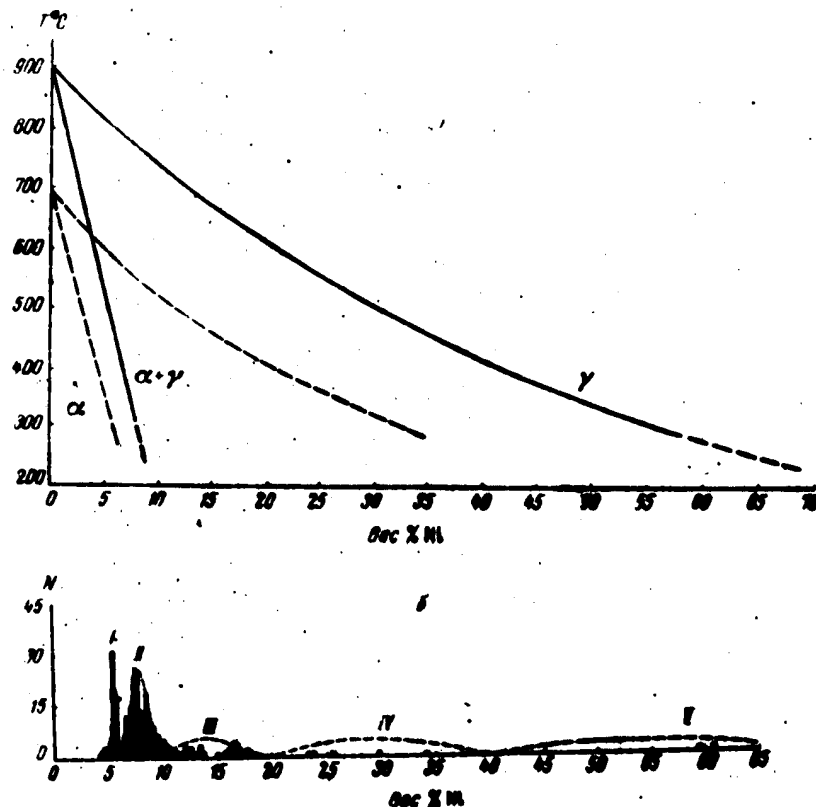


Рис. 3. а — диаграмма фазового равновесия системы Fe — Ni (при температуре ниже 900°C); сплошная линия — Оуэн, Лиу (1 атм.); штриховая линия — Лиль (1 атм.); пунктир — Юлиг (10⁵ атм. — расчет); б — распределение железных метеоритов по содержанию никеля

по нижней кривой. При дальнейшем понижении температуры наряду с увеличением количества α -фазы за счет γ -фазы происходит изменение состава фаз: γ -фазы — по верхней кривой и α -фазы — по нижней.

Из этого, таким образом, следует, что попытки представить состав фаз метеоритного железа в виде определенных химических формул (например, Бадхью [13]) не имеют под собой основания, так как Fe и Ni не образуют в области концентраций до 75% никеля химических соединений или упорядоченных твердых растворов. Также нет оснований представлять в виде химического соединения состав гексаэдритов [13], входящих в I группу метеоритов. Как видно на рис. 3, состав железных метеоритов различных групп вообще не связан с диаграммой состояния системы Fe — Ni, т. е. с составом α - и γ -фаз, а определяется другими причинами, указанными ранее [1].

Если концентрация никеля в сплаве не превышает нескольких процентов, весь сплав переходит в α -фазу, которая в итоге медленного охлаждения будет состоять из весьма крупных кристаллов. Сплав, имеющий большее содержание никеля, останется двухфазным и сохранит видманштет-

тову структуру, которая по мере постепенного охлаждения будет становиться все грубее в связи с ростом кристаллов (балок) α -фазы вдоль октаэдрических плоскостей с одновременным повышением содержания Ni в обеих фазах.

При быстром охлаждении γ -фаза превращается в метастабильную α_2 -фазу с искаженной объемноцентрированной кубической решеткой того же состава, что и γ -фаза. При ее нагреве происходит распад на γ - и α -фазы в тонкодисперсном состоянии со структурой, аналогичной той, которая наблюдается у атакситов. Никакой последующий нагрев тонкодисперсного сплава в области $(\alpha + \gamma)$ не сможет привести к его перекристаллизации с образованием видманштеттовой структуры.

Таким образом крупнокристаллическая структура гексаэдритов и видманштеттова — октаэдритов объясняются медленным охлаждением.

Несмотря на убедительность металлургических данных, А. Н. Заварицкий [14] предложил искать объяснение структуры железных метеоритов в ее перекристаллизации (метаморфизме), а не в медленном охлаждении. В качестве доказательства этого предположения он сослался на явно ошибочные работы Бредли [5] и Оуэна [8], цитированные выше. Далее, противореча самому себе, А. Н. Заварицкий [15] привел для системы Fe — Ni неправильную диаграмму эвтектичного типа, но все же допускающую образование крупнокристаллической структуры путем медленного охлаждения сплава.

Для объяснения первичной крупнокристаллической структуры γ -фаз А. Н. Заварицкий предложил совершенно иной механизм — рост кристаллов γ -фазы в тугоплавких расплавленных каналах железа.

Таким образом вместо единого процесса образования структуры железных метеоритов, который объясняется диаграммой равновесия системы Fe — Ni, построенной на основании экспериментальных данных, А. Н. Заварицкий предложил без достаточных доводов весьма искусственную схему этого процесса. Основной предвзяткой для такого вывода было стремление А. Н. Заварицкого согласовать образование железных метеоритов со своими представлениями о происхождении хондр, о чем речь будет идти ниже. Такой подход к объяснению структуры железных метеоритов явился причиной неверных выводов А. Н. Заварицкого в этом вопросе.

Очевидно, более правильным является продолжение изучения условий образования структуры железных метеоритов на основе равновесной диаграммы состояния системы Fe — Ni (в первом приближении).

Сравнение состава фаз железных метеоритов с этой диаграммой (построенной при давлении в 1 атм) показывает, что содержание никеля в камасите (6,2% Ni) и тэните (в среднем около 30% Ni) ниже, чем состав соответствующих фаз при низких температурах.

Для объяснения этого расхождения Гендерсон и Перри [16] предположили, что медленное охлаждение железо-никелевого сплава происходило лишь до 450°C, после чего оно сменилось быстрым охлаждением, в результате которого был зафиксирован соответствующий этой температуре состав каждой фазы, отвечающий составу камасита и тэнита в метеоритах.

Иное объяснение дал в своей работе Юнг [17], который считал это результатом влияния высокого давления — порядка 10⁴ атм. При таком давлении, по расчету Юнга, должно произойти снижение температур превращений в железо-никелевом сплаве на 200—300° (рис. 3). Вследствие этого состав фаз, образовавшихся при медленном охлаждении до 300°C или до более низкой температуры, при которой скорость диффузии чрезвычайно мала, такая отвечает составу камасита и тэнита в метеоритах.

Юнг также объясняет ряд деталей структуры железных метеоритов, если допустить внезапное снятие давления и возникновение в сплаве ударной волны.

Свои результаты авторы объясняют тем, что железные метеориты образовались в большом теле, которое затем внезапно разрушилось, что при-



вели к быстрому охлаждению сплава (по Гендерсону и Перри) или внезапному снижению давления (по Юлигу).

Следует заметить, что картина образования структуры железных метеоритов, по-видимому, была несколько сложнее, чем предполагали эти авторы. По их мнению, конечная температура образования структуры всех железных метеоритов постоянна. По Гендерсону и Перри она равна 450°C (при давлении 1 атм), по Юлигу — около 300°C (при давлении порядка 10^4 атм). В таком случае должна была бы наблюдаться однозначная связь между содержанием никеля и структурой метеоритов. В действительности же имеется большое число железных метеоритов с одинаковым содержанием никеля, но с различной структурой. Это может быть результатом того, что в них зафиксированы структуры, образовавшиеся при разных температурах и, по-видимому, при разных давлениях: а именно, (взяв промежуточные условия между данными указанных авторов), — в интервале температур ниже 450°C и давлений — менее 10^4 атм.

Фиксирование структуры можно объяснить быстрым охлаждением сплава от данной температуры. Так, например, среди железных метеоритов I группы структура гексаэдритов, очевидно, была зафиксирована при более низкой температуре, чем у грубоструктурных октаэдритов. В последних быстрое охлаждение наступило раньше, чем они перешли в однофазную область, в результате чего в них смогла сохраниться октаэдритовая структура, присущая более высокой температуре.

В то же время грубоструктурные октаэдриты II группы должны были в момент фиксации структуры находиться при более низкой температуре, чем тонкоструктурные октаэдриты того же состава, согласно сказанному ранее о росте балок α -фазы с понижением температуры.

Отсюда следует, что после длительного периода медленного остывания внезапно произошло быстрое охлаждение сплава. Различие температур в отдельных частях сплава проще всего объясняется тем, что сплав был большого объема со значительным перепадом температур по его сечению. Это подтверждает вывод, что железные метеориты соответствуют центральным частям больших тел — астероидов. Если считать, что астероиды охлаждались от периферии к центру, то грубоструктурные октаэдриты I группы (структуры которых зафиксированы при более высокой температуре) должны отвечать внутренней части этого центрального ядра, а гексаэдриты — внешней части. Во II группе из внутренней части образовались весьма тонкоструктурные октаэдриты (возможно, в части богатых никелем атакситов), а из внешней — грубоструктурные октаэдриты.

Сказанное выше о температурных условиях в такой же мере относится и к давлению. Как было показано ранее, повышение давления влияет на фазовые переходы, аналогично понижению температуры, а именно, задерживает наступление превращения $\gamma \rightarrow \alpha$, т. е. начало образования октаэдритовой структуры. Но в более глубоких частях железного ядра, наряду с повышенной температурой должно быть и более высокое давление, вследствие чего их влияние оказывается параллельным.

В итоге можно сделать вывод, что структура железных метеоритов отражает условия, существовавшие в недрах астероидов до их раскола, с которым, по-видимому, и связано быстрое понижение температуры и давления центральных частей этих тел.

Теперь кратко рассмотрим особенности структуры остальных подклассов метеоритов.

Структура палласитов представляет собой сплошную сетку железо-никелевого сплава, с видманштеттовыми фигурами, в промежутках которой вкраплены зерна оливина.

В мезосидеритах никелистое железо рассеяно в виде отдельных включений в силикатной массе, имеющей полнокристаллическую структуру.

Хондриты характеризуются наличием мелких шариков — хондр, состоящих в основном из чистых минералов — оливина и пироксена —

FOR OFFICIAL USE ONLY

и заключенных в основной мелкозернистой массе того же состава, что и хондры. Никелистое железо встречается в виде мелких зерен неправильной формы, а иногда также в форме шариков (железные хондры). Внутренняя структура хондр свидетельствует о том, что они являются результатом сравнительно быстрой кристаллизации расплавленного вещества [14].

Структура ахондритов, бедных кальцием, отличается от структуры хондритов отсутствием в ней хондр.

Ахондриты, богатые кальцием, имеют структуру, подобную структуре земных базальтов и диабазов. В некоторых типах из них преобладает мелкообломочное строение.

Между всеми этими типами структур метеоритов имеются переходные формы.

Таким образом тот вывод, что структура железных метеоритов образовалась в недрах астероидов, должен относиться не только к метеоритам этого класса. Наоборот, поскольку мы наблюдаем постепенный переход от одного класса метеоритов к другому не только по составу, но и по структуре, можно считать, что структура вещества железо-каменных и каменных метеоритов также в основном сформировалась в тот период, когда оно составляло эти тела. Отсюда следует, в частности, что хондры, входящие в состав основной части каменных метеоритов, возникли еще в процессе образования указанных космических тел и сохранились при их дальнейшей эволюции.

Этот результат коренным образом отличается от предположений А. Н. Заварицкого, а также Юри и Крейга об условиях образования хондр и хондритов вообще.

По Заварицкому [14] хондры образовались в результате распада родоначальной планеты и возникновения при этом тумана мелких распыленных капелек вещества, далее быстро застывших. А. Н. Заварицкий в виде альтернативного выдвигал также предположение относительно образования хондр путем вулканических извержений на родоначальной планете. Однако в своих последних работах [18] он отказался от этого представления ввиду возникших трудностей.

Структура хондритов, согласно мнению А. Н. Заварицкого, образовалась после распада планеты, вследствие чего он распространил этот вывод и на железные метеориты, считая, как указывалось выше, их структуру результатом позднейшей перекристаллизации.

Аналогичное представление относительно образования хондр и хондритов предложили Юри и Крейг [19]. Основное различие между их предположением и гипотезой А. Н. Заварицкого состоит в следующем. А. Н. Заварицкий считал на основании одинакового среднего состава хондр и межхондрового вещества, что хондры, как и остальная часть хондритов, образовались из перидотитовой оболочки планеты при ее распаде.

По Юри и Крейгу хондры произошли из минералов внешних частей астероидов при столкновении последних, а затем, смешавшись с внутренними частями каждого астероида в отдельности, образовали хондриты.

Такие предположения кажутся нам довольно искусственными.

В то же время сделанный нами общий вывод относительно образования структуры метеоритов в крупных телах подтверждается также широко распространенным явлением метаморфизма структуры в железных и каменных метеоритах. В железных метеоритах метаморфизм структуры имеет, по видимому, термический характер и проявляется главным образом в метеоритах I группы — гексаэдритах, часть которых в результате нагревания получила мелкозернистую структуру. Подобные метеориты называются атакситами, бедными никелем. В остальных группах наблюдается уменьшение степени метаморфизма [20].

Метаморфизм структуры каменных метеоритов, подробно изученный А. Н. Заварицким [14], состоит в перекристаллизации хондритов (термический метаморфизм) и в образовании водных силикатов (гидротермальный

метаморфизм). Второй вид метаморфизма мог происходить при сравнительно невысоких температурах ($300-400^{\circ}\text{C}$) и наблюдается в углистых хондри-тах.

Если расположить хондриты по группам и проследить, как в них проявляется метаморфизм, то оказывается, что максимальная степень метаморфизма наблюдается в хондритах I группы, а минимальная — в хондри-тах V группы (углистых), т. е. здесь наблюдается та же последовательность в степени метаморфизма, что и в железных метеоритах. Отсюда выходит, что метаморфизм, очевидно, имел общие причины для целых групп метеоритов, т. е. для отдельных астероидов.

Таким образом, можно сделать вывод, что не только образование структуры метеоритного вещества, но также и метаморфизм ее, по-видимому, происходил до момента раскола астероидов. На этом основании автором было в свое время сделано предположение, что между образованием этих тел и их дроблением на метеориты лежит большой промежуток времени, и что метеориты, как самостоятельные тела, образовались сравнительно недавно. Это предположение подтверждается работами Зингера [21] и других авторов, которые на основании исследования количества He^3 в метеоритах определили, что метеориты в виде осколков существуют всего сотни миллионов лет.

На основании данных о структуре метеоритов можно сделать следующие общие предположения относительно возможности ее образования.

След. за возникновением силикатной фазы из окисленной части метеоритной материи и металлической — из неокисленной части, вещество этих фаз (или по крайней мере его часть), по-видимому, получило вид мелких шариков — хондр. В это же время должна была происходить дифференциация фаз (полностью незавершившаяся), при которой могли сохраниться хондры. Последнее обстоятельство, как справедливо отмечал А. П. Виноградов [22], указывает на то, что дифференциация фаз происходила иным путем, чем выплавление металла из первоначально гомогенной железо-силикатной массы.

В результате этой дифференциации основная масса астероида, состоящая из силикатной фазы с примесью никелистого железа, получила хондровую структуру, а центральная железо-никелевая часть при медленном остывании получила крупнокристаллическую структуру — видманштеттову при соответствующем содержании никеля. Наличие метаморфизованных структур в метеоритах свидетельствует, как говорилось выше, о процессах нагрева, происходивших в астероидах до их раскола.

Все это указывает на сложность термической истории астероидов, которая рассматривается в недавней работе Джейкобса и Аллана [23].

Говоря о структуре метеоритного вещества следует упомянуть также, что некоторые метеориты имеют обломочное, т. наз. брекчиевое, строение. Это свидетельствует о том, что в процессе образования метеоритов, очевидно происходили дробление и аггломерация их вещества.

Мы здесь остановили внимание на основных, с нашей точки зрения, моментах, не касаясь многих других вопросов.

Большую роль в решение проблемы происхождения метеоритов может играть, как известно, систематическое определение возраста метеоритов различных типов. Однако в настоящее время можно достаточно определенно говорить, по-видимому, лишь о максимальном возрасте метеоритного вещества, который достигает, по последним определениям, 4,8 миллиарда лет. Существенное значение для общей проблемы имеет также исследование физических свойств метеоритов — плотности, пористости, теплопроводности и др.

Мы не рассматривали также вопроса о содержании малых примесей в метеоритах ввиду ограниченности в настоящее время систематизированных данных, хотя уже сейчас можно видеть, что распределение отдельных элементов в метеоритах может характеризовать различные этапы истории

Док.

А. А. Явнель

метеоритного вещества. Например, различное содержание в железных метеоритах платины определяется, очевидно, дифференциацией протостероидальной материи (аналогично содержанию никеля). В то же время содержание гелия связано каким-то образом со структурой железных метеоритов, т. е. с процессами, происходившими внутри астероидальных тел, а количество гелия в железных метеоритах в определенной мере обусловлено ядерными реакциями, возникшими под действием космических лучей уже после дробления астероидов на мелкие осколки.

Разработка законченной теории происхождения метеоритов потребует, естественно, использования данных не только о их составе, но и согласования с астрономическими представлениями по этому вопросу, что является задачей многих исследователей.

Выводы

Обобщение данных о химическом составе метеоритного вещества позволило выявить в нем ряд новых закономерностей — разделение метеоритов на пять групп по составу металлической и силикатной фаз и шесть подклассов по соотношению количеств каждой фазы в отдельной группе; связь между составом и количеством каждой фазы в отдельных подклассах различных групп («групповая» закономерность Прайора); соотношение между составом и количеством каждой фазы в различных группах в целом («первичная» закономерность Прайора); закономерное изменение элементарного состава различных групп метеоритов.

В результате объяснения этих закономерностей сделан вывод о том, что метеоритное вещество в своем развитии прошло этапы дифференциации по химическому составу, разделения на отдельные тела (астероиды) и дифференциации фаз в каждом астероиде.

Минеральный состав и структура метеоритов подтверждают выводы об их образовании из отдельных крупных слоистых тел. На основании сопоставления особенностей структуры метеоритов различных подклассов высказаны предположения о термической истории астероидов, объясняющие эти особенности.

Основные результаты и выводы работы критически сопоставлены с данными, полученными по рассматриваемому вопросу другими авторами.

Комитет по метеоритам
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
3 декабря 1956 г.

Литература

1. А. А. Явнель, Астр. журн., 34, 445, 1957.
2. S. H. Perry, The Metallography of Meteoric Iron. Washington, 1944.
3. А. А. Явнель, Метеоритика, 7, 141, 1950.
4. A. J. Bradley, H. J. Goldschmidt, Journ. Iron Steel Inst., 139, 11, 1939.
5. A. J. Bradley, Nature, 143, 518, 1939.
6. F. G. Watson, Between the Planets, 1945, стр. 188.
7. М. П. Сливинский, Металлург, № 8, 7, 1932.
8. E. A. Owen, Nature, 142, 999, 1938.
9. S. W. Smith, J. Young, Nature, 142, 1162, 1938.
10. E. A. Owen, A. H. Sully, Phil. Mag., 184, 614, 1939.
11. E. A. Owen, Y. H. Liu, Journ. Iron Steel Inst., 163, 132, 1949.
12. F. Libl, Arch. Eisenhüttenwesen, 25, 475, 1954.
13. J. D. Buddhue, Meteoritics, 1, № 1, 97, 1935.
14. А. Н. Заварицкий, Метеоритика, 4, 50, 1948; 8, 100, 1950.
15. А. Н. Заварицкий, Л. Г. Кваша, Метеориты СССР, Изд. АН СССР, ч. I, 1952.
16. E. P. Henderson, S. H. Perry, Geochim. et Cosmochim. Acta, 6, № 5/6, 221, 1954.

17. H. H. Uhlig, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 6, № 5/6, 282, 1954; 7, № 1/2, 34, 1955.
18. А. Н. Заварицкий, Труды 1-го совещания по вопросам космогонии 1951, стр. 191.
19. H. C. Urey, H. Craig, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 4, № 1/2, 36, 1953.
20. А. А. Явнель, ДАН СССР, 102, № 3, 477, 1955.
21. S. P. Singer, *Scient. Amer.*, 191, № 5, 36, 1954.
22. А. П. Виноградов, Вестник МГУ, № 4—5, 169, 1955.
23. J. H. Jacobs, D. W. Allan, *Journ. Roy. Astr. Soc. Canada*, 50, № 3, 122, 1956.